

**PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA
ELÉCTRICA CON RECURSOS LIMITADOS Y MÚLTIPLES MODOS DE
EJECUCIÓN EN COLOMBIA.**

JOSÉ SANTIAGO ARRIETA GIRALDO

**Universidad Tecnológica de Pereira
Maestría en Ingeniería Eléctrica
Pereira – Colombia
2018**

**PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA
ELÉCTRICA CON RECURSOS LIMITADOS Y MÚLTIPLES MODOS DE
EJECUCIÓN EN COLOMBIA.**

JOSÉ SANTIAGO ARRIETA GIRALDO

**Proyecto de grado presentado como requisito para
optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director: Ph.D. Juan José Mora Flórez

**Universidad Tecnológica de Pereira
Maestría en Ingeniería Eléctrica
Pereira – Colombia
2018**

Nota de aceptación

Ph.D. Juan José Mora Flórez
Director

Ph.D. Mauricio Granada Echeverri
Jurado

M.Sc. Andrés Ricardo Herrera Orozco
Jurado

Ph.D. Andrés Escobar
Director Programa Maestría en Ingeniería Eléctrica

Agradecimientos

Deseo expresar mis sinceros agradecimientos a Dios, por darme la capacidad, disciplina, salud y fuerza para seguir adelante con todos mis objetivos y el desarrollo de mis metas. A mis familiares y amigos, por su gran apoyo y labor a lo largo de mi vida.

Además, agradezco al Ph.D. Juan José Mora Flórez, por su amistad, apoyo y acompañamiento en la dirección de esta tesis. Finalmente, a los docentes, quienes compartieron su conocimiento y experiencia, formándome para cumplir los objetivos hoy alcanzados.

Gracias.

José Santiago Arrieta Giraldo

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 Introducción	8
1.1 Motivación	8
1.2 Definición del problema.....	8
1.3 Gestión de Proyectos	9
1.4 Ejecución óptima de proyectos.....	10
1.5 Ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia.	11
1.6 Objetivos.....	11
1.6.1 Objetivo general.....	11
1.6.2 Objetivos específicos	11
1.7 Introducción a la metodología propuesta	12
1.7.1 Problema de programación de proyectos con recursos limitados y único modo de ejecución RCPSP.	12
1.7.2 Problemas de programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP).	13
1.8 Aportes del proyecto de grado	13
1.9 Estructura del documento	14
2 Aspectos teóricos	15
2.1 Desarrollo teórico matemático del Problema de programación de proyectos con recursos limitados y único modo de ejecución RCPSP.	15
2.2 Desarrollo teórico matemático del Problema de programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP).	17
2.3 Gerencia de proyectos.....	20
2.4 Normatividad y regulación para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia.	23
2.4.1 Cumplimiento en términos de alcance, tiempos y costo	25
2.4.2 Requisitos de los diseños técnicos para líneas de transmisión y subestaciones	25

2.4.3 Reglamentación ambiental y social para proyectos de infraestructura lineal en Colombia²⁷

3	Metodología propuesta	30
3.1	Modelo matemático	30
3.2	Técnica de solución del modelo	35
3.3	Estrategia de estructuración del problema de ejecución óptima de proyectos.....	36
3.4	Estrategia para considerar imprevistos, cambios y contingencias durante la ejecución real de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y múltiples modos de ejecución	38
3.5	Diagrama de flujo del algoritmo empleado por la metodología propuesta	40
4	Aplicación de la metodología propuesta	41
4.1	Introducción	41
4.2	Descripción de los sistemas de prueba y prototipos.	41
4.2.1	Descripción del sistema de prueba 1	41
4.2.2	Descripción del sistema de prueba 2.....	42
4.3	Procedimiento de implementación.....	43
4.4	Resultados obtenidos	45
4.4.1	Resultados obtenidos para el sistema de prueba 1	45
4.4.2	Resultados obtenidos para el sistema de prueba 2	46
4.5	Características y tendencias del comportamiento de la metodología propuesta ...	47
5	Conclusiones y recomendaciones	48
5.1	Conclusiones	48
5.2	Recomendaciones.....	49
5.3	Trabajos futuros	49
5.4	Publicaciones	50
6	Referencias	51
7	Anexos	53
7.1	Anexo 1	53
7.2	Anexo 2	57

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Estructura de la matriz de relaciones de precedencia.	36
Tabla 2 Estructura de la matriz de las duraciones de ejecución de cada actividad según el modo y la cantidad de recursos asociada	37
Tabla 3 Sistema de prueba implementado en MS Project (Sistema de prueba 1).....	42
Tabla 4 Sistema de prueba implementado en MS Project (Sistema de prueba 2).....	43
Tabla 5 Sistema de prueba 1 incluyendo diferentes modos de ejecución y los recursos requeridos por cada actividad.....	44
Tabla 6 Resultado óptimo sistema de prueba 1.....	46
Tabla 7 Resultado óptimo sistema de prueba 2.....	47

1 Introducción

1.1 Motivación

El sector energético colombiano tiene un papel muy importante en términos de sus aportes al PIB, a las exportaciones y a la economía colombiana. Hoy en día se puede afirmar, que durante la última crisis financiera mundial ha sido uno de los sectores que más ha contribuido a mantener la economía de los países (Unidad de Planeación Minero Energetica UPME 2010).

La expansión de los sistemas eléctricos de potencia, cubriendo la permanente necesidad de acondicionar el sistema a los requerimientos en demanda y garantizando integridad operativa, constituye un factor que determina el estado de desarrollo y crecimiento de los países. Para trabajar este tema en la actualidad, la industria requiere profesionales en ingeniería eléctrica con una formación multidisciplinaria sólida en el área de la gerencia de proyectos de infraestructura eléctrica.

Este trabajo surge tras identificar la necesidad de contar con un documento que proporcione al lector, los conocimientos básicos para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica de alta tensión en Colombia. Incluyendo elementos como la gerencia de proyectos y metodologías para la optimización de procesos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución, con el fin de garantizar una ejecución óptima en términos de costo, recursos y tiempo.

Para garantizar un desarrollo adecuado de la temática propuesta anteriormente, se debe considerar dentro de la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica los componentes tecnológicos, económicos y regulatorios asociados.

1.2 Definición del problema

La búsqueda de una programación óptima en un proyecto, cuando existen recursos limitados, es un problema muy complejo. Esta dificultad, intrínseca al problema, aumenta por la naturaleza combinatoria del mismo, al tener que coordinar restricciones y secuencias tecnológicas con requerimientos y disponibilidades. Por otra parte, una formulación matemática rigurosa es difícil de acoplar, con la relativa imprevisibilidad de la mayor parte de las restricciones del problema. (Posada 2009)

Un proyecto se conforma por un número de actividades, cada actividad puede ser procesada en uno de varios posibles modos de ejecución y cada modo representa una manera diferente de realizar la actividad que está siendo considerada. El modo determina la duración de la actividad, los requerimientos de los diferentes tipos de recursos, y cualquier otra característica asociada con la actividad. Entre las actividades del proyecto se definen las relaciones de precedencia cuando se determina el orden en que deben ejecutarse.

Los recursos utilizados por las actividades se clasifican principalmente en dos grandes categorías: renovables y no renovables. Los recursos renovables como las horas hombre, máquinas, herramientas, equipos o espacio están disponibles periodo a periodo, es decir, la cantidad disponible se renueva de un periodo a otro. Los recursos no renovables como dinero, materias primas o combustibles, tienen un total disponible durante todo el proyecto y se van consumiendo conforme se ejecutan las actividades (Posada 2009).

La programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución MRCPSP (Multi-Modal Resource Constrained Project Scheduling) ha sido un tema de gran interés por parte de la comunidad científica. La literatura especializada cuenta con gran número de trabajos en los cuales se muestran múltiples técnicas metaheurísticas para resolver el problema, pero pocos trabajos se enfocan en desarrollar un modelo ajustado del problema de ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica que garanticen una solución específica y de buena calidad.

Actualmente la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia es un tema que no reporta en literatura especializada, un modelado contundente ni técnicas de optimización definidas.

El enfoque central de este trabajo consiste en modelar el problema de la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia ajustándolo mediante MRCPSP, buscando optimizar la duración del proyecto y el costo del mismo, teniendo en cuenta recursos renovables y no renovables. Proporcionando una herramienta que no solo contribuya al seguimiento del proyecto, sino que también, que aporte en la toma de decisiones durante la ejecución del mismo.

1.3 Gestión de Proyectos

Para estudiar la evolución de la gestión de proyectos se podría citar numerosos antecedentes de teorías elementales, que evidencian que la preocupación por la gestión de organizaciones es tan antigua como las primeras sociedades (Chain y Reinaldo 2008). Sus inicios están históricamente relacionados con proyectos de ingeniería de construcción de obras civiles en Mesopotamia y en el Imperio Romano, donde intervenían la logística o la creación de equipos de trabajo, con categorías profesionales definidas, el control de costos y tiempos y la

aplicación de soluciones normalizadas, donde también entraban en juego muchos elementos de gestión (identificación de objetivos, gestión de recursos humanos, logística, identificación de riesgos, financiación, etc.), (Zeledón 2015)

La gestión de proyectos, en su forma moderna, empieza a desarrollarse hace algunas décadas. A principios de 1960, las empresas y otras organizaciones empezaron a considerar la necesidad crítica de estructurar el trabajo, a través de múltiples departamentos integrados por miembros con una profesionalidad claramente definida (UNED 2017).

La gestión de proyectos es necesaria en cualquier entorno. Todo proyecto hace referencia al cambio, y el cambio es algo imperativo para el siglo XXI, demandado desde varias instancias diferentes al mismo tiempo. El crecimiento, el cambio y los proyectos van de la mano (UNED 2017).

La definición de proyecto ha sido ampliamente discutida a través del tiempo, cambiando según el autor o el contexto. El Project Management Institute (Project Management Institute 2008) ha definido un proyecto, como un esfuerzo temporal realizado para crear un producto, servicio o resultado único; y entre los autores es común encontrar definiciones similares, como la realización de una actividad compleja susceptible de descomponerse en una serie de tareas o actividades interdependientes entre sí, en cuanto a su orden de ejecución (Romero 2002).

Tradicionalmente, los proyectos se planifican y se ejecutan según una secuencia bien establecida, que empieza con una estrategia convenida, que supone la idea de una acción precisa, que luego se formula, se ejecuta y se evalúa para mejorar la estrategia y las intervenciones futuras. Para ello se utilizan muchas herramientas de gerencia de proyectos, que también pueden ser adaptadas para la implementación o control del planeamiento estratégico (Hernandez 2011).

1.4 Ejecución óptima de proyectos

La ejecución óptima de proyectos es un tema ampliamente estudiado por muchas ramas de la investigación, donde siempre se busca encontrar las mejores alternativas de costo, tiempo, riesgo, y recuperación de la inversión. La ciencia ha dedicado grandes esfuerzos a encontrar una metodología, que garantice una ejecución óptima.

La gestión de un proyecto permite obtener información, a partir de la cual es posible tomar decisiones. La toma de decisiones es un proceso de selección entre diferentes alternativas de acción, teniendo como base un conjunto de criterios, con el fin de alcanzar uno o más objetivos. Una buena gestión de proyectos es indispensable para renunciar a resultados o cuestiones favorables con el fin de alcanzar el objetivo global del proyecto.

La esencia de la optimización efectiva es examinar y evaluar la planificación de todo el proyecto y desarrollar métodos o plantear alternativas, que incrementen la eficiencia en la ejecución del proyecto.

1.5 Ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia.

Cada país presenta una reglamentación establecida en concordancia con las leyes vigentes, que le permite planear, regular, controlar y desarrollar todo lo asociado al tema de infraestructura eléctrica. Es tan importante este aspecto que puede determinar el índice de desarrollo de una nación.

En Colombia existen varias entidades encargadas de supervisar la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, de la mano con el desarrollo del país y cada uno de los agentes involucrados en esta cadena. Ellos deben garantizar el cumplimiento con la reglamentación vigente.

En el marco teórico de este trabajo se desarrolla todo el proceso asociado a la normatividad, planeación y ejecución, para proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia relacionados con el STN (Sistema de Transmisión Nacional).

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar y validar una metodología generalizada para la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.

1.6.2 Objetivos específicos

- a. Determinar el estado del arte del problema de ejecución óptima para proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.
- b. Implementar una metodología genérica basada en el MRCPSP (Multi-Modal Resource Constrained Project Scheduling), que brinde una herramienta para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica de alta tensión. Buscando incluir elementos como la gerencia de proyectos, la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y los múltiples modos de ejecución de cada actividad a realizar, con el

fin de garantizar un uso racional de los recursos y una visión integral de los todos los aspectos relacionados con este tema.

- c. Ajustar el modelo de la metodología a implementar para la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y múltiples modos de ejecución, identificando las principales variables del problema y sus restricciones.
- d. Desarrollar una estrategia para codificar el cronograma de actividades y la disponibilidad de recursos de un proyecto de infraestructura eléctrica, como datos de entrada de la metodología a proponer.
- e. Desarrollar una estrategia que considere los imprevistos, retrasos, contingencias y alteraciones durante la ejecución real de proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.
- f. Validar el funcionamiento de la metodología propuesta mediante la resolución de un problema MRCPSP propuesto en la literatura especializada.
- g. Validar el comportamiento de la metodología a implementar frente a los tiempos de duración y recursos consumidos por proyectos de infraestructura eléctrica tipo.
- h. Documentar los resultados de la investigación.

1.7 Introducción a la metodología propuesta

1.7.1 Problema de programación de proyectos con recursos limitados y único modo de ejecución RCPSP.

El problema de programación de proyectos con recursos limitados y un único modo de ejecución de las actividades RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem), ha atraído la atención de un gran número de investigadores y ha sido ampliamente estudiado en la literatura. Es un problema combinatorio clásico que aparece en las líneas de manufactura y producción, en particular en líneas de ensamble o sistemas de producción que se puede acoplar con la ejecución de proyectos de infraestructura Eléctrica. La formulación de modelos matemáticos ha sido abordada por diversos autores, los más difundidos en la literatura son, (Pritsker, Watters y Wolfe 1969), (Kaplan 1988), (Alvarez-Valdes y Tamarit, The project scheduling polyhedron: dimension, facets and lifting theorems 1993) y (Mingozi, y otros

1998). La programación de proyectos con recursos limitados y un único modo de ejecución proporciona una base conceptual inicial para el modelado del problema.

1.7.2 Problemas de programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP).

Una extensión del RCPSP es la ejecución de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución. Para esta variación del modelo se agregan dos conceptos adicionales.

Uno de ellos son los recursos no renovables que denotan recursos cuya disponibilidad no se restaura durante la ejecución del proyecto, es decir, existe sólo una cierta cantidad de ellos para todo el proyecto y al igual que para los recursos renovables desarrollados en la sección anterior cada actividad puede consumir una cantidad determinada de ellos.

En el MRCPSP (Multi-Modal Resource Constrained Project Scheduling Problem) no existe solo una manera de ejecutar una actividad, tanto el tiempo de proceso como el consumo de recursos de una actividad, dependen del modo de ejecución elegido para la misma. De igual manera que para el RCPSP, todas las actividades deben ser ejecutadas y cada una de ellas debe ser realizada de manera continua sin pausas o interrupciones después de su inicio.

Esta extensión a desarrollar modela la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica de manera adecuada. Normalmente la programación de proyectos no sólo se refiere a la asignación de tiempos de inicio de las actividades a ejecutar, sino también tiene que ver, con la toma de decisiones al momento de ejecutar cada actividad. Con este modelo la asignación de actividades a diferentes tipos de equipos de trabajo o de recursos (Posada 2009).

1.8 Aportes del proyecto de grado

La propuesta aquí presentada se basa en desarrollar y validar una metodología generalizada para la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.

Entre los aportes del proyecto se tiene:

- Propuesta para una metodología para la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.
- Elaboración de artículo con base en los resultados de esta investigación. Nombre del artículo: Programación óptima de procesos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución en proyectos de infraestructura eléctrica. Autores: José Santiago Arrieta Giraldo y Juan José Mora Flórez.

- Participación en Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL 2017 y Ponencia en las Jornadas del Conocimiento 2017 de ISA S.A. E.S.P.
- Desarrollo en Visual Basic, para codificar el cronograma de actividades de un proyecto y ejecutar la metodología de MCPSP.

1.9 Estructura del documento

Este documento está dividido en cinco capítulos. El primer capítulo es introductorio, y en él se expone, la motivación por la cual se realiza este proyecto, la definición del problema, abordando una breve descripción de la temática de MCPSP, en proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia, los objetivos trazados, la introducción a la metodología propuesta y los principales aportes de la tesis.

El capítulo dos se enfoca en exponer los aspectos teóricos más relevantes a tener en cuenta en el desarrollo del trabajo, incluyendo el problema de programación de proyectos con recursos limitados y único modo de ejecución RCPSP y el Problemas de programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP). De igual manera se incluyen elementos de gerencia de proyectos y se describe el proceso para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica de alta tensión en Colombia.

Luego en el capítulo tres, se desarrolla una metodología basada en el MRCPSP, para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica de alta tensión, lo anterior identificando los parámetros y variables que tengan mayor incidencia sobre el problema y sus restricciones. De igual manera se propone una estrategia que considere los imprevistos, retrasos, contingencias y alteraciones durante la ejecución real de proyecto, teniendo en cuenta que actualmente existen varias metodologías dentro de la gestión de proyectos para el control del riesgo. Finalmente se muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en la metodología propuesta.

En el capítulo cuatro, se muestra la aplicación de la metodología, en donde se describe los diferentes sistemas de prueba utilizados, los métodos de solución y el análisis de resultados.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas en el desarrollo de esta investigación y se dan algunas recomendaciones, además de posibles trabajos futuros que surgen de este proyecto de grado.

2 Aspectos teóricos

2.1 Desarrollo teórico matemático del Problema de programación de proyectos con recursos limitados y único modo de ejecución RCPSP.

A continuación, se desarrollan cada uno de los componentes, variables, restricciones y funciones objetivo que permiten dar una introducción al uso del RCPSP en la ejecución de proyectos.

Para la ejecución de un proyecto, inicialmente se cuenta con un número entero de actividades $1, \dots, n$ a realizar. Todas las actividades deben ser ejecutadas y cada una de ellas debe ser realizada de manera continua sin pausas o interrupciones después de su inicio. Adicionalmente dos actividades ficticias 0 y $n+1$ son agregadas para representar el inicio y el fin del proyecto. Todas las actividades forman el conjunto $V = \{0, \dots, n+1\}$ (Posada 2009), (Sturm 2012).

Cada actividad i tiene un tiempo de ejecución asociado p_i y las actividades ficticias tienen un tiempo de procesamiento igual a cero, es decir, $p_0 = p_{n+1} = 0$.

Una solución adecuada para un RCPSP asigna un tiempo S_i de inicio a cada una de las actividades del proyecto, tal asignación $S = (S_i) \in V$ corresponde a la programación de actividades. El tiempo de inicio para la actividad ficticia que representa el inicio del proyecto es igual cero $s_0 = 0$ y el tiempo asignado a la actividad ficticia que representa el fin del proyecto y corresponde a la duración misma del proyecto es llamado *makespan*, este último es uno de los objetivos a minimizar en este trabajo (Alvarez-Valdes y Tamarit., The project scheduling polyhedron: dimension, facets and lifting theorems. 1993).

En la programación de proyectos de infraestructura eléctrica es normal que existan un gran número de restricciones asociadas a la ejecución de las actividades. Algunas actividades tienen que ser ejecutadas antes de permitir que otras inicien. Estas relaciones de precedencia se modelan mediante la definición de conjuntos de actividades sucesoras $suc(i)$ y predecesoras $pre(i)$ para cada actividad i . Teniendo en cuenta que $pre(0) = \emptyset$ y $suc(n+1) = \emptyset$. Pueden formularse las restricciones a razón de las relaciones de precedencia usando la asignación de tiempos de programación S , considerando que para una actividad i con un conjunto de actividades sucesoras $suc(i)$, cumpliendo la ecuación (1) (Zimmermann, Neumann y Schwindt. 2002), (Zimmermann, Neumann y Schwindt. 2002).

$$S_j - S_i \geq p_i, j \in suc(i) \quad (1)$$

Adicionalmente es necesario incluir las restricciones asociadas a los recursos renovables R , llamados así porque están disponibles en diferente medida durante toda la ejecución del proyecto dependiendo de la etapa del mismo, ejemplos de estos son las horas hombre, la

maquinaria, las herramientas, los equipos o el espacio que está disponible periodo a periodo, es decir, la cantidad disponible se renueva de un periodo a otro.

La cantidad de cada tipo recurso $k \in R$ está dada por R_k , además la cantidad del recurso tipo k empleado para la ejecución de una actividad i está dado r_{ik} . Para integrar estas limitaciones ocasionadas por la disponibilidad de recursos renovables en el problema, el conjunto de actividades activas para cada periodo t del proyecto se puede definir como se muestra en la ecuación (2).

$$A(S, t) = \{i \in V \mid S_i \leq t < S_i + p_i\}, t \geq 0 \quad (2)$$

Con esta definición, es posible formular el consumo de recursos de un periodo determinado en el tiempo (3):

$$r_k(S, t) = \sum_{i \in A(S, t)} r_{ik}, k \in R, t \geq 0 \quad (3)$$

Para la formalización completa del problema es necesario un límite superior para la duración del proyecto. De manera intuitiva esta se puede calcular como la suma de todos los tiempos de ejecución de las actividades p_i .

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (4)$$

Con esta cota superior las restricciones de recursos pueden ser formuladas como en la ecuación (5).

$$r_k(S, t) \leq R_k, k \in R, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (5)$$

Finalmente, el RCPSP se puede modelar matemáticamente con el conjunto de ecuaciones de (6) a (10) :

$$\text{Min } S_{n+1}, \quad \text{s. a.} \quad (6)$$

$$r_k(S, t) \leq R_k, k \in R, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (7)$$

$$S_j - S_i \geq p_i, i \in V, j \in \text{suc}(i) \quad (8)$$

$$S_i \geq 0 \quad i \in V \quad (9)$$

$$S_0 = 0 \quad (10)$$

2.2 Desarrollo teórico matemático del Problema de programación de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución (MRCPSP).

Extendiendo la formulación matemática implementada para el modelo RCPSP, se incluyen los siguientes nuevos conceptos, el primero de ellos es M_i asociado al modo de ejecución de la actividad i . La variable $x_{im_i} \in \{0,1\}$, $i \in V$, $m_i \in M_i$ indica que la actividad i es realizada en el modo de ejecución m_i , resaltando que cada actividad solo puede ser ejecutada en un único modo de ejecución, cumpliéndose lo indicado en la ecuación (11):

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i} = 1, i \in V \quad (11)$$

Para modelar el MRCPSP debemos hacer una diferenciación entre los dos tipos de recursos a implementar. R^v será usado para los recursos no renovables y R^p para los recursos renovables. Ambos tipos de recursos tienen una capacidad R_k , $k \in R^v \cup R^p$ (S. Hartmann 1999).

Podemos considerar un subproblema del MRCPSP encontrar la asignación del modo factible para todas las actividades, considerando un modo completo de asignación es decir un vector $x = (x_{im_i})$ que satisface la condición de proporcionar un modo de ejecución único para cada actividad y adicionalmente el uso de recursos no renovables factibles con respecto a los límites de los mismos (Elmaghraby 1997). (Kolisch y Drexel. 1997)

Se definirá el consumo de recursos k para la actividad i en el modo de ejecución m_i como r_{ikm_i} . De acuerdo a lo anterior el consumo de recursos no renovables k por una actividad i puede ser calculado como se indica en (12):

$$r_{ik}^v = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, i \in V, k \in R^v \quad (12)$$

El consumo global de un recurso no renovable para la asignación de un modo de ejecución completa x está dado por:

$$r_k^v(x) = \sum_{i \in V} r_{ik}^v(x), \quad k \in R^v \quad (13)$$

Un modo de ejecución es factible siempre y cuando se cumpla la limitación de recursos no renovables:

$$r_k^v(x) \leq R_k, \quad k \in R^v \quad (14)$$

Aparte del consumo de recursos, los tiempos de procesamiento también pueden depender del modo de ejecución elegido. Por lo tanto, el tiempo de procesamiento de una actividad i , si se ejecuta en el modo m_i se denota por p_{im_i} (Kolisch y Drexel. 1997). Después de asignar un modo de ejecución el tiempo de procesamiento de una actividad está dada por (15):

$$p_i = \sum_{m_i \in M_i} p_{im_i} x_{im_i}, \quad i \in V \quad (15)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos reformular las restricciones de tiempo del RCPSP como se expresa en la ecuación (16):

$$S_j - S_i \geq p_i(x), \quad j \in \text{suc}(i) \quad (16)$$

Análogamente lo mismo se puede realizar para las necesidades de recursos renovables de una actividad i para un modo de ejecución x asignado.

$$r_{ik}^p = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, \quad (17)$$

Así el conjunto de actividades activas en un tiempo t programado para un periodo de tiempo S y un modo de ejecución asignado x se puede expresar como se muestra en (18):

$$A(S, t, x) = \{i \in V \mid S_i \leq t < S_i + p_i(x)\} \quad (18)$$

Con esta definición es posible formular el consumo de recursos renovables programados para un periodo de tiempo S con respecto a un modo de ejecución asignado x .

$$r_k^p(S, t, x) = \sum_{i \in A(S, t, x)} r_{ik}^p(x), k \in R^p, t \geq 0 \quad (19)$$

De manera similar al RCPSP para la formalización completa del problema es necesario establecer un límite superior para la duración del proyecto para la formulación de las restricciones de recursos renovables. La única diferencia es que en el caso de la MRCPSP se utiliza el tiempo máximo de procesamiento de todos los modos de ejecución.

$$\bar{d} = \sum_{i \in V} \max p_{im_i} \quad (20)$$

De esta manera se tienen todos los elementos necesarios para declarar las restricciones de recursos renovables para el MRCPSP.

$$r_k^p(S, t, x) \leq R_k(x), k \in R^p, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (21)$$

Finalmente, el MRCPSP para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica se puede modelar matemáticamente con las ecuaciones de la (22) a la (29)

$$\text{Min } S_{n+1}, \quad \text{s. a.} \quad (22)$$

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i} = 1, \quad i \in V \quad (23)$$

$$r_k^v(x) \leq R_k, \quad k \in R^v \quad (24)$$

$$r_k^p(S, t, x) = R_i(x), \quad k \in R^p, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (25)$$

$$S_j - S_i \geq p_i(x), \quad j \in \text{suc}(i) \quad (26)$$

$$S_i \geq 0 \quad i \in V \quad (27)$$

$$S_0 = 0 \quad (28)$$

$$x_{im_i} \in \{0,1\} \quad i \in V, m_i \in M_i \quad (29)$$

De acuerdo con lo anterior es posible inferir que el RCPSP es un caso particular del MRCPSP donde solo existe un solo modo de ejecución para cada actividad y no existen recursos no renovables.

2.3 Gerencia de proyectos

Es necesario remontarse a la última mitad del siglo XIX y a la complejidad experimentada en el entorno de los negocios, para entender cómo la gestión de proyectos se desarrolló a partir de los principios de gerencia. Los proyectos a gran escala emprendidos por los gobiernos fueron el impulso de las primeras decisiones de gestión. Durante el último período de la segunda revolución industrial, el crecimiento acelerado y desorganizado de las empresas produjo una complejidad en su administración y exigió un enfoque científico para sustituir el empirismo y la improvisación (UNED 2017).

Sólo hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX las múltiples técnicas de gestión de proyectos comenzaron a tomar forma y a integrarse dentro de un sistema coherente. El impulsor de este gran esfuerzo fue el Departamento de Defensa de los Estados Unidos durante el proyecto de desarrollo del misil Polaris. Para dirigir con éxito este gran proyecto era necesario realizar cuidadosamente la planificación y coordinación de las diferentes actividades que lo componían, lo cual sólo fue posible mediante el uso de procedimientos formales basados en el uso de redes (UNED 2017). A partir de técnicas como los Diagramas de Gantt para la planificación de proyectos, los estudios de Markov sobre procesos estocásticos, la teoría de colas, etc., los consultores que trabajaban en la construcción del misil desarrollaron la metodología PERT (Program Evaluation Review Techniques) la cual les permitió finalizar dos años antes de lo previsto el proyecto. Durante este período se introducen los conceptos de Ciclo de Vida del Proyecto (Comité Anderson, 1959), Estructura Desagregada del Proyecto (EDP) o Project Breakdown Structure (PBS) y Estructura Desagregada del Trabajo del proyecto (EDT) o Work Breakdown Structure (WBS) (1962). En 1964 se desarrolla la teoría del Valor Ganado y el Método de Diagramas de Precedencia (MDP) o Precedent Diagram Method (PDM), para la planificación de proyectos.

En todo proyecto existen tres factores fundamentales: Tiempo, costo y alcance. Además, es posible que el proyecto disponga de una serie de hitos intermedios por cumplir (Posada 2009).

El costo está asociado al factor humano, maquinaria, material, uso de instalaciones u otros elementos que al final se traducen en un presupuesto económico. Para todos los proyectos el costo supone una limitación. La cantidad de tiempo dedicado a las tareas individuales determina la calidad global del proyecto. A lo largo de un proyecto la calidad puede tener un impacto significativo en el tiempo y en el costo (o viceversa).

Finalmente, el objetivo es completar el proyecto según las restricciones de tiempo, costo, alcance y calidad establecidas por el cliente. Cada vez más las compañías utilizan una organización basada en proyectos dentro de un rango muy amplio de aplicaciones: investigación y desarrollo, desarrollo de software, construcción, infraestructura pública, operaciones de mantenimiento, desarrollo de productos, entre otros.

Para manejar de manera adecuada los tres factores de un proyecto surge la gestión de proyectos (Project management), que es la disciplina de organizar y administrar recursos de manera tal que se pueda culminar todo el trabajo requerido en el proyecto dentro del alcance, el tiempo, y costo definidos.

El ciclo de vida del proyecto consta de cuatro etapas: planeación del proyecto, programación del proyecto, control del proyecto y terminación del proyecto.

La planificación del proyecto consiste en definir los objetivos, el presupuesto, las actividades y en estimar sus duraciones aproximadas y los recursos que requieren. Las técnicas de planificación se ocupan de estructurar las tareas a realizar dentro del proyecto, definiendo la duración y el orden de ejecución de las mismas.

Durante la programación del proyecto se establecen las secuencias en las que se especifica el tiempo de inicio para cada actividad, teniendo en cuenta la restricción de recursos y las relaciones de precedencia entre las actividades. Dicha secuencia es la base que se utiliza en la ejecución del proyecto. Así mismo, permite visualizar el proyecto de inicio a fin y es una herramienta valiosa de comunicación y planificación interna y externa.

Una vez que el proyecto y sus componentes han sido definidos de la manera adecuada, el proyecto se pone en ejecución y se inicia con la fase de control del trabajo realizado. Se analizan las diferencias entre lo programado y lo ejecutado y de ser necesario se ponen en marcha las medidas correctivas que sean necesarias (Project Management Institute 2008).

Una vez finalizado el proyecto debe hacerse un Análisis y Evaluación de las diferencias presentadas entre lo planeado y lo ejecutado y la manera en que se resolvieron estas diferencias en la fase de control. La satisfacción del cliente es el objetivo último de la gestión de proyecto. En la fase de terminación se proporciona nuevos factores a la hora de planificar un proyecto similar, estimar mejor los tiempos de duración o los recursos requeridos, proporcionando un aprendizaje importante a los responsables de la planificación y control (Demeulemeester y Herroelen. 2002).

Todas las técnicas para la dirección y control de proyectos aplican conocimientos, habilidades, recursos y herramientas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del

mismo, garantizando los menores costos en los menores tiempos y con altos estándares de calidad.

Las técnicas y métodos de dirección, control y análisis de proyectos han experimentado un fuerte impulso en los últimos años, entre estas se destacan las siguientes:

- El método PERT (Program Evaluation and Research Technique) en sus dos vertientes: PERT-tiempos y PERT-costos.
- Diagramas de Gantt.
- Diagramas Milestone.
- Método de la ruta crítica CPM (Critical Path Method)
- Método del Diagrama de Flechas ADM (Arrow Diagramming Method)
- Método del Diagrama de Precedencias PDM (Precedence Diagram Method)
- Método de valor ganado EVA (Earned Value Analysis)

Todas estas técnicas y métodos buscan asignar los distintos recursos (personas, dinero, materiales, etc.) a las distintas actividades que componen el proyecto, identificando la relación existente entre las distintas actividades para lograr una asignación de recursos y un plazo de ejecución óptimo.

La finalidad principal de una de las guías más influyentes en la gerencia de proyectos como lo es el PMBOK, es identificar el subconjunto de fundamentos de la dirección de proyectos generalmente reconocido como buenas prácticas, si ser un compendio de todos los conocimientos sobre dirección de proyectos. Para lograr lo anterior se fundamenta en los siguientes aspectos:

- a) **Gerencia de la Integración:** incluye los procesos y actividades necesarios para identificar, definir, combinar, unificar y coordinar los diversos procesos y actividades de gerencia de proyectos dentro de los Grupos de Procesos de la Gerencia de Proyectos. A continuación, se destacan los principales hitos:
- b) **Gerencia del Alcance:** los procesos requeridos para asegurar que el proyecto incluye todo el trabajo requerido y solamente el trabajo requerido, para poder terminar exitosamente. Se relaciona principalmente con la definición y el control de lo que se incluye o no en el proyecto.
- c) **Gerencia del Costo:** Los procesos requeridos para asegurar que, al finalizar el proyecto, los costos no superen el presupuesto aprobado.
- d) **Gerencia del Tiempo:** El conjunto de procesos requeridos para asegurar la finalización a tiempo de un proyecto.
- e) **Gerencia de la Calidad:** proceso que implica la coordinación de todos los recursos disponibles en una organización (humanos, tecnológicos, físicos y financieros); para que a través de los procesos de planificación, organización, dirección y control se logren objetivos previamente establecidos

- f) **Gerencia del Riesgo:** El conjunto de procesos concernientes con la conducción de la planeación de la gerencia de riesgos, la identificación, el análisis, las respuestas y el monitoreo y control sobre un proyecto.
- g) **Gerencia de las Comunicaciones:** basada en una plataforma multifacética de servicios especializados en las áreas de comunicación, atención a los medios y a los interlocutores del proyecto en general.
- h) **Gerencia de Adquisiciones y Contratos:** Hace referencia a los procesos de compra o adquisición de los productos, servicios o resultados que es necesario para obtener fuera del equipo del proyecto a fin de realizar el trabajo.
- i) **Gerencia del Recursos Humano:** considera los objetivos individuales de los miembros que participan en el proyecto como esencia de su desarrollo personal y corporativo.

2.4 Normatividad y regulación para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia.

En este numeral se describe el proceso desde la planeación de expansión del Sistema de Transmisión Nacional, incluyendo el proceso de ofertas, la adjudicación del proyecto, la planeación financiera y de tiempos, los diferentes tipos de contratos, el plan de gestión, las interventorías externas de un proyecto, los trámites sociales y el licenciamiento ambiental, la etapa de obra civil y montaje electromecánico, hasta finalmente llegar a la puesta en servicio del proyecto.

Mediante la Ley 142 de 1994, también llamada Ley de Servicios Públicos Domiciliarios y con base en mandatos de la Constitución de 1991, se introdujo el modelo de mercados en competencia para la prestación de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, sometidos a la regulación, control y vigilancia por parte del Estado. Para el servicio de energía eléctrica en particular, con la Ley 143 de ese mismo año se estableció el esquema aplicable a las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de electricidad, así como los elementos y principios rectores del (Mercado de Energía Mayorista) (CREG 2018). Este mercado entró en funcionamiento el 20 de julio de 1995 bajo este enfoque.

La participación del Estado a partir de la introducción del modelo de competencia, tiene lugar en tres instancias a través de una estructura que ha permanecido sin modificaciones desde 1994:

- La definición de la política energética.
- La regulación y la vigilancia.
- El control.

La primera está a cargo del Ministerio de Minas y Energía. Una parte esencial de la política energética se desarrolla a través de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), unidad administrativa especial adscrita al Ministerio de Minas y Energía, que tiene como parte de sus funciones establecer los requerimientos energéticos del país y elaborar el Plan Energético Nacional y el Plan de Expansión del sector eléctrico, ambos de naturaleza indicativa, en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo.

La tarea regulatoria es desarrollada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), integrada por ocho miembros:

- El ministro de Minas y Energía, quien la preside.
- El Ministro de Hacienda y Crédito Público.
- El director del Departamento Nacional de Planeación.
- Cinco expertos en asuntos energéticos, de dedicación exclusiva, nombrados por el presidente de la República para periodos de cuatro años.

La labor de vigilancia y control de la prestación de los servicios públicos domiciliarios la desempeña la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. El superintendente es nombrado por el presidente de la República.

De igual manera el Consejo Nacional de Operación (CNO) del sector eléctrico, creado por la Ley 143 de 1994 en su artículo 36, es un organismo privado que tiene como función principal acordar los aspectos técnicos para garantizar que la operación del Sistema Interconectado Nacional sea segura, confiable, económica y ser el ejecutor del Reglamento de Operación. Está conformado de acuerdo a lo previsto en el artículo 37 de la Ley 143 de 1994.

Además de las mencionadas instituciones, el Mercado de energía mayorista cuenta para su funcionamiento con un ente central denominado Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC) encargado del registro de contratos, la liquidación y la facturación de todas las transacciones que se efectúen en este mercado. La planeación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación y transmisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) está a cargo del Centro Nacional de Despacho (CND), que junto con el ASIC son dependencias de la empresa XM Sociedad Anónima Empresa de Servicios Públicos, regulada por la CREG.

La adecuada y oportuna expansión de la red eléctrica permite garantizar no sólo la continuidad del servicio de energía eléctrica, sino también su prestación a un menor costo. Es así como XM, en el marco del Comité Asesor de Planeamiento de la Transmisión, CAPT, trabaja de manera coordinada con la Unidad de Planeación Minero Energético, UPME, en los análisis técnicos y económicos requeridos para la definición de nuevas obras de infraestructura

necesarias para la expansión de la red eléctrica. Dentro de las obras recomendadas como resultado de los diferentes estudios se identifican la instalación de condensadores, dispositivos de electrónica de potencia (Sistemas de Control de Voltaje –SVC- y Compensadores Estáticos –STATCOM-), nuevas líneas de transmisión a diferentes niveles de tensión, transformadores y nuevas subestaciones eléctricas, siendo obras que permiten la atención de nuevos usuarios y el crecimiento de la economía del país.

La UPME regida por la Ley 143 de 1994 y por el decreto número 1258 de junio 17 de 2013, en cumplimiento de la normatividad vigente, elabora quinquenalmente un plan indicativo de expansión de la cobertura de energía eléctrica, PIEC, para estimar las inversiones públicas que deben ejecutarse y las privadas que deben estimularse, en búsqueda de la expansión de del servicio de energía eléctrica.

Posterior a la publicación de la convocatoria de ampliación por parte de la UPME, las diferentes empresas del mercado ofertan de acuerdo a los documentos de selección de inversionista (DSI), considerando los siguientes aspectos en términos de alcance, tiempos, costo, diseños técnicos, calidad y reglamentación ambiental y social para proyectos de infraestructura lineal en Colombia (UPME 2018).

A continuación, se presentan los principales aspectos a tener en consideración para optar por la adjudicación de la convocatoria, en cada uno de los aspectos mencionados en el párrafo anterior:

2.4.1 Cumplimiento en términos de alcance, tiempos y costo

En materia de alcance y tiempos es necesario garantizar lo solicitado por la UPME de acuerdo a las necesidades del país. Para el costo la UPME adjudicará la convocatoria al inversionista que presente el menor valor para la ejecución y operación del proyecto.

2.4.2 Requisitos de los diseños técnicos para líneas de transmisión y subestaciones

Líneas de transmisión

Se deben garantizar todos los estudios eléctricos que permitan definir los parámetros requeridos para el diseño detallado de las líneas de transmisión, se debe contar como mínimo con la elaboración de los siguientes documentos técnicos y/o memorias de cálculo:

- Meteorología de la zona en la que se diseñará la línea: temperatura máxima ambiente, promedio, mínima absoluta, mínima coincidente; velocidades de viento: máxima de

diseño con período de recurrencia de una vez cada 50 años y máxima promedio; humedad relativa; densidad del aire; nivel cerámico.

- Cartografía digital y/o en copia dura actualizada de la zona de influencia de la línea en la mejor escala posible (1:25.000 - 1:10.000)
- Normas: RETIE, Código de Redes, IEC, ANSI, ASTM, NESC, IEEE, ASCE,
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) en los aspectos que tengan que ver con los diferentes tópicos del diseño.
- Resultado de la investigación sobre la presencia de aeropuertos, aeródromos y sobre tránsito aéreo en el área de influencia de la línea. Normas aeronáuticas sobre señalización de la línea y procedimiento para someter a la consideración y aprobación del Departamento Aeronáutico Civil los casos concretos que requieren señalización.
- Resultado de la investigación sobre la presencia de contaminantes en el área que ocasionan corrosión sobre los distintos componentes de la línea (sal) o que afectan el aislamiento (sal, polvillo de carbón, ceniza volcánica, etc.)
- Distancias de seguridad para el plantillado de las líneas.
- Criterios para el levantamiento topográfico del eje de la línea y de los detalles planimétricos en la franja de servidumbre.
- Selección de la ruta de la línea. (Informe y planos)
- Trazado y levantamiento del eje de la línea y los detalles planimétricos (Informe)
- Cálculo de las carteras topográficas del trazado. (Informe y carteras)
- Selección del conductor y el cable de guarda. (Informe)
- Cálculo de flechas y tensiones del conductor y del cable de guarda. (Informe y resultados)
- Selección óptima del conjunto estructural y localización óptima de estructuras. (Informe con parámetros de diseño de cada tipo de torre y planos para replanteo)
- Replanteo de la línea. (Informe)
- Cálculo de carteras topográficas del replanteo. (Informe y carteras)
- Estudio de suelos. (Informe con recomendaciones y resultados de laboratorio)
- Diseño de cimentaciones. (Informe y planos)
- Diseño y coordinación del aislamiento de la línea. (Informe)
- Elaboración de los planos de planta y perfil plantillados. (Planos)
- Elaboración de la tabla de estructuras. (Tabla)
- Elaboración de los planos con la silueta de cada tipo de estructura y con los árboles de carga para las diferentes hipótesis de carga consideradas. (Informe y planos)
- Diseño de amortiguamiento. (Informe y resultados)
- Selección del cuerpo y las extensiones de pata de cada torre. (Esquemas y tabla de resultados)
- Cálculo de las tablas de regulación del conductor y del cable de guarda. (Tablas)

Subestaciones eléctricas

Se deben garantizar todos los estudios eléctricos que permitan definir los parámetros requeridos para el diseño detallado de las subestaciones eléctricas, se debe contar como mínimo con la elaboración de los siguientes documentos técnicos y/o memorias de cálculo:

- Condiciones atmosféricas del sitio de instalación, parámetros ambientales y meteorológicos, contaminación ambiental.
- Estudios topográficos, geotécnicos, sísmicos y de resistividad.
- Información con que debe contar el adjudicatario para realizar los estudios requeridos como flujo de carga, corto circuito, estudios de sobretensiones, estabilidad, coordinación de protecciones. Cálculos de flechas y tensiones de los barrajes.
- Selección de aislamiento de acuerdo con metodología IEC o ANSI, incluyendo selección de pararrayos y distancias eléctricas.
- Estudio de cargas ejercidas sobre las estructuras metálicas de soporte debida a sismo y a corto circuito.
- Estudio de estabilidad para determinar tiempos máximos de despeje de fallas y sobre tensiones por rechazo de carga.
- Selección de equipos, conductores para barrajes, cables de guarda y conductores aislados.
- Memoria de revisión de los enlaces PLP existentes.
- Estudio de apantallamiento.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) en los aspectos que tengan que ver con los diferentes tópicos del diseño.
- Diseño de cimentaciones, memorias de cálculo y planos estructurales de la subestación.
- Dimensionamiento de los servicios auxiliares AC & DC.
- Cumplimiento de normas RETIE.

2.4.3 Reglamentación ambiental y social para proyectos de infraestructura lineal en Colombia

El proyecto debe causar algún tipo de impacto en el contexto o entorno en el cual se va a ejecutar. Es de vital importancia que el equipo que conforma el proyecto tenga clara las consecuencias que puede acarrear una decisión que se tome dentro del proyecto, sobre el

entorno que rodea el mismo; así pues, debe tenerse muy presente los aspectos que se asocian al entorno del proyecto tales como el cultural, social, internacional, político y físico.

Entorno Cultural y Social: Tener claro algunos aspectos como lo son: económicos, demográficos, educativos, éticos, étnicos, religiosos, y de otras características de las personas es importante a la hora de determinar de qué manera puede influir el proyecto sobre ellas y viceversa; además de ello debe entenderse que políticas sociales adopta la organización y sus repercusiones sobre los aspectos antes mencionados.

Entorno Internacional y Político: Políticas y/o costumbres de los países o ciudades deben tenerse en cuenta, algunas de ellas pueden ser: el huso horario, los días festivos de la región, las políticas de importación o exportación de materiales o productos, los aspectos de seguridad, las políticas de inmigración o migración etc.

Entorno Físico: Aspectos físicos de la región como el clima, la ecología la topología la fauna y la flora pueden jugar un papel muy importante en las decisiones que puedan verse involucradas con el proyecto en cualquiera de sus fases. Para dar cumplimiento a la reglamentación en este aspecto, antes de desarrollar el proyecto es necesario desarrollar cada uno de los siguientes ítems:

- Aplicación Decreto No. 2820 de agosto de 2010 de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por el cual se reglamenta el Título VIII de la ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
- Diagnóstico ambiental de alternativas – DAA.
- Aplicativo DA-TER-3-01 del sector de Energía, para la elaboración del DAA para Líneas de Transmisión y/o Tramos y Subestaciones.
- Aplicativo Decreto No. 330 de 2007, por el cual se reglamentan las audiencias públicas ambientales.
- Estudio de Impacto Ambiental – EIA.
- Aplicativo LI-TER-1-01 del sector de Energía, para la elaboración del EIA para Líneas de Transmisión y/o Tramos y Subestaciones.
- Plan de Manejo Ambiental – PMA.
- Aplicativo Decreto No. 1320 de 1998, por el cual se reglamenta la consulta previa con las comunidades indígenas y negras para la explotación de los recursos naturales dentro de su territorio.
- Directiva Presidencial No. 001 de 2010.
- Ley 1450 de 2011, expedida por el Congreso Nacional y Publicada el 16 de junio de 2011, establece el Plan Nacional de Desarrollo para el presente cuatrienio, 2010-2014, véase el capítulo V, “Sostenibilidad Ambiental y la Prevención del Riesgo”

Tras garantizar el cumplimiento de toda la normatividad y documentación requerida, es posible participar en el proceso para la adjudicación del proyecto e iniciar la adjudicación del mismo. Lo anterior busca que se realice una ejecución enmarcada en parámetros técnicos y normativos adecuados, que generen un resultado de calidad.

3 Metodología propuesta

Este capítulo muestra de manera detallada, el procedimiento a realizar para abordar el problema de la ejecución óptima de proyectos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución, articulado con la información de propuestas encontradas en la literatura especializada.

Inicialmente se parte del desarrollo y particularización del modelo matemático del problema. Posteriormente se presenta la estrategia para la estructuración de la metodología y finalmente se realiza la descripción del algoritmo implementado.

3.1 Modelo matemático

Para la ejecución de un proyecto, inicialmente se cuenta con un número entero de actividades a realizar. Todas las actividades se tienen que ejecutar y cada una de ellas se debe realizar de manera continua, sin pausas o interrupciones una vez se les da inicio. Adicionalmente, se consideran dos actividades ficticias 0 y $n+1$, que sirven para representar el inicio y el fin del proyecto. Todas las actividades forman el conjunto $V = \{0, \dots, n+1\}$. Cada actividad i tiene un tiempo de ejecución asociado p_i y las actividades ficticias tienen un tiempo de procesamiento igual a cero, es decir, $p_0 = p_{n+1} = 0$ (Sturm 2012).

Generalmente, la programación de proyectos se refiere a la asignación de tiempos de inicio de las actividades a realizar, y está asociada con la toma de decisiones en la manera de ejecutar una actividad. Con este modelo, se considera la asignación de actividades o recursos a diferentes equipos de trabajo (Posada 2009).

A partir de lo expuesto, se incluyen los siguientes conceptos, el primero de ellos es el conjunto M_i , asociado a los modos de ejecución de la actividad i . La variable $x_{im_i} \in \{0,1\}$, $i \in V$, $m_i \in M_i$, la cual indica que la actividad i se realiza en el modo de ejecución m_i . Como restricción, cada actividad se debe ejecutar en un único modo de ejecución, como se representa en (30).

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i} = 1, i \in V \quad (30)$$

El modelo de MRCPSP establece una diferenciación entre dos tipos de recursos: R^v denota los recursos no renovables cuya disponibilidad va disminuyendo a medida que se consumen, y R^p los recursos renovables que se ocupan de la ejecución de una actividad y se liberan al terminarla para iniciar otra de forma sucesiva durante todo el proyecto. Ambos tipos de

recursos tienen un parámetro de disponibilidad asociado $R_k, k \in R^v \cup R^p$ (S. Hartmann 1999) [5]

Adicionalmente, se define la variable r_{ikm_i} como el consumo de recurso k requerido por la actividad i en el modo de ejecución m_i . De acuerdo a lo anterior, el consumo de recursos no renovables k por una actividad i se calcula de acuerdo a (31).

$$r_{ik}^v = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, \quad i \in V, k \in R^v \quad (31)$$

El consumo global de un recurso no renovable para una secuencia de ejecución programada está dado por (32).

$$r_k^v(x) = \sum_{i \in V} r_{ik}^v(x), \quad k \in R^v \quad (32)$$

Un programa de ejecución del proyecto es factible siempre y cuando se cumpla con el límite de consumo de recursos no renovables (33).

$$r_k^v(x) \leq R_k, \quad k \in R^v \quad (33)$$

Además del consumo de recursos, los tiempos de ejecución también dependen del modo de ejecución asignado. Por lo tanto, el tiempo de la actividad i en el modo m_i se denota por p_{im_i} . Después de asignar un modo de ejecución, el tiempo de procesamiento de la actividad está dado por (34).

$$p_i = \sum_{m_i \in M_i} p_{im_i} x_{im_i}, \quad i \in V \quad (34)$$

Para las restricciones asociadas a las actividades predecesoras y sucesoras, se consideran todos los tipos de relaciones de precedencia: Fin – Comienzo FC, Comienzo – Comienzo CC; Fin –

Fin FF o Comienzo – Fin CF, donde se incluyen los periodos de adelanto o retraso entre actividades. Ésta consideración dentro del modelo matemático formulado en este trabajo, constituye un aporte a destacar, debido a que, en versiones del modelo encontradas en la literatura, únicamente se contemplan las relaciones de tipo FC.

$$S_j - S_i \geq p_i(x) + diasFC_{ij}(x) \quad j \in sucFC(i) \quad (35)$$

$$S_j - S_i \geq diasCC_{ij}(x) \quad j \in sucCC(i) \quad (36)$$

$$S_j - S_i \geq p_i(x) - p_j(x) + diasFF_{ij}(x) \quad j \in sucFF(i) \quad (37)$$

$$S_i - S_j \geq p_j(x) + diasCF_{ij}(x) \quad j \in sucCF(i) \quad (38)$$

Se considera que la actividad i puede tener un conjunto de actividades sucesoras $sucFC(i)$, $sucCC(i)$, $sucFF(i)$ o $sucCF(i)$, dependiendo de la relación de precedencia con las demás actividades, al igual que un periodo de retraso o adelanto establecido en días.

Los requerimientos de recursos renovables para la actividad i en la secuencia de ejecución programada x se representan con la expresión (39).

$$r_{ik}^p = \sum_{m_i \in M_i} r_{ikm_i} x_{im_i}, \quad (39)$$

Así, el conjunto de actividades en ejecución durante el periodo t programado para un horizonte de tiempo S y una secuencia de ejecución programada x se expresa con (40).

$$A(S, t, x) = \{i \in V \mid S_t \leq t < S_t + p_i(x)\} \quad (40)$$

Con esta definición, es posible formular el consumo de recursos renovables programados para un horizonte de tiempo S con respecto a una secuencia de ejecución asignada x , tal como se presenta en (41).

$$r_k^p(S, t, x) = \sum_{i \in A(S, t, x)} r_{ik}^p(x), k \in R^p, t \geq 0 \quad (41)$$

Para la formulación completa del problema, es necesario establecer una cota superior de la duración de todo el proyecto y declarar las restricciones de consumo de recursos renovables, utilizando el mayor tiempo de ejecución de cada actividad i , tal como se presenta en (42) (S. Hartmann 1999).

$$\bar{d} = \sum_{i \in V} \max p_{im_i} \quad (42)$$

Con lo anterior, se tienen todos los elementos necesarios para declarar las restricciones de recursos renovables para el MRCPSP, según se presenta en (43) (Klaus 2002).

$$r_k^p(S, t, x) \leq R_k(x), k \in R^p, 0 \leq t \leq \bar{d} \quad (43)$$

Cuando se codificar la expresión (43) de forma determinística, se presentan dificultades para declarar el conjunto de actividades activas en un tiempo t programado para un periodo de tiempo S y una secuencia de ejecución programada x , debido a que la ejecución de cada actividad depende de las variables de decisión. A continuación, se propone una estrategia que considera la implementación de variables binarias, que permite expresar el consumo de recursos renovables de una manera novedosa y práctica.

Inicialmente se introduce la variable binaria a_{im_t} , la cual sólo es igual a 1 durante el tiempo de ejecución de la actividad i en el modo de ejecución m para el periodo de tiempo t . A partir de este supuesto se obtiene (44).

$$a_{im_t} = \begin{cases} 1 & S_i \leq t < S_i + p_i \\ 0 & t < S_i \\ 0 & t \geq S_i + p_i \end{cases} \quad (44)$$

Posteriormente es necesario plantear la intersección de variables binarias para determinar los rangos en los que a_{im_t} puede tomar el valor de 1, como se muestra de (45) a (47).

$$a_{im_t} \geq x_{im} + a_{1it} + a_{2it} - 2, \quad (45)$$

$$i \in V, m \in M_i, t = 0 \dots \bar{d}$$

$$BigM * a_{1it} \geq (S_i + p_i) - t + 1, \quad (46)$$

$$i \in V, t = 0 \dots \bar{d}$$

$$BigM * a_{2it} \geq t - S_i, \quad i \in V, t = 0 \dots \bar{d} \quad (47)$$

Con las restricciones binarias planteadas se garantiza que la actividad i se ejecute de forma ininterrumpida, desde su periodo de inicio S_i y durante su duración p_i respectiva al modo de ejecución m_i asignado. El parámetro $BigM$ es ampliamente usado en este tipo de formulaciones binarias para “activar” o “desactivar” una restricción, según el valor que tome la variable binaria asociada.

De esta manera es posible formular el consumo de recursos renovables durante el proyecto mediante (48).

$$r_{kt}^p = \sum_{i \in V} \sum_{m \in M_i} r_{ikm_i} a_{im_t}, k \in R^p, \quad t = 0 \dots \bar{d} \quad (48)$$

Para formular un problema mono-objetivo, donde se pondera y se busca minimizar el tiempo de ejecución del proyecto su costo, se usa (49).

$$Min (g1 * S_{n+1} + g2 * r_k^v(x)) \quad s. a. \quad (49)$$

Donde $g1$ y $g2$ corresponden a factores de ponderación de la función objetivo que permiten dar mayor importancia a uno de los objetivos. Para efectos de comparación con el sistema de prueba de referencia, se toma $g1=1$ y $g2=0$.

3.2 Técnica de solución del modelo

En el proceso de implementación de la técnica de solución para el modelo matemático que representa el problema, es necesario identificar a qué tipo pertenece. Los problemas de optimización matemática se clasifican según los siguientes aspectos (Escobar 2007):

- a. Forma de su función objetivo y de sus restricciones (Programación Lineal y Programación No Lineal).
- b. Tipo de variables (Programación Entera, Programación Mixta y Programación Binaria).
- c. Existencia o no de restricciones (Programación Irrestricida y Programación Restricida).
- d. Dimensión de sus variables (Programación en una variable y programación Multivariable).
- e. Dimensión de la función objetivo (Programación Mono-objetivo y Programación Multiobjetivo).
- f. Complejidad computacional del problema (Problemas tipo P, Problemas tipo NP y Problemas tipo NP completos).

A partir de la clasificación del problema a resolver, se debe seleccionar e implementar la técnica de solución adecuada. El modelo matemático del MRCPSP para la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica se clasifica dentro de los problemas de programación lineal entera mixta y restringida. Para el caso puntual de este trabajo debido al tamaño de los problemas, se busca la solución con técnicas exactas.

Según análisis de referencias se demuestra que, entre mayor sea el número de actividades consideradas para el modelo de MRCPSP, se hace más difícil llegar a un resultado óptimo con una técnica de solución exacta debido a la explosión combinatoria de soluciones factibles [9]. Por lo anterior, en la práctica las técnicas aproximadas como las heurísticas y metaheurísticas son las más adecuadas para encontrar soluciones factibles y cercanas al óptimo global del problema (Posada 2009).

La mayor parte de los métodos exactos usados para resolver este problema se basan en procedimientos de ramificación y poda (Branch and Bound) (Demeulemeester y Herroelen. 2002). De forma general, estas metodologías enumeran las soluciones posibles a través de un árbol de búsqueda y su eficiencia depende de la cota inferior seleccionada para el problema, que se obtiene por diferentes procedimientos, como la relajación de restricciones del consumo de recursos.

El método de solución usado en este trabajo es una técnica exacta, mediante el uso de diferentes solvers y del lenguaje de programación matemática (AMPL). La utilización de este tipo de herramientas es común en los procesos de optimización, debido a que cuentan con técnicas especializadas de alto nivel, que permiten obtener una adecuada representación matemática de los procesos.

En este caso, el lenguaje AMPL es el utilizado para articular todos los componentes del problema de optimización: el modelo matemático, los datos de entrada y la técnica de solución. El “solver” es el algoritmo que contiene la técnica de solución óptima. Un mismo modelo desarrollado en AMPL puede ser solucionado con diferentes “solvers”.

3.3 Estrategia de estructuración del problema de ejecución óptima de proyectos.

Para codificar el cronograma de actividades y los recursos de un proyecto de infraestructura eléctrica es necesario declarar, identificar y agrupar la información como se muestra en esta sección, con el fin de implementar los modelos RCPSP o MRCPPSP descritos anteriormente.

Inicialmente identificamos el número de periodos u horizonte del proyecto \bar{d} y la cantidad de actividades del mismo.

$$T = \bar{d} = T$$

$$J = i = J$$

Posteriormente se debe declarar la cantidad de tipos de recursos renovables y no renovables con que cuenta el proyecto:

$$K^p = R^p = KR$$

$$K^v = R^v = KN$$

De la misma manera, se declara la matriz de relaciones de precedencia, en la cual se asocia cada actividad del proyecto con su número de modos de ejecución y con sus actividades sucesoras, dentro de esta matriz se incluyen las actividades ficticias de inicio y fin del proyecto de acuerdo a lo modelado.

Actividad	# Modos	# Sucesoras	Actividades sucesoras
1	M[1]	#Suc de 1	. n .
.	M[.]	#Suc de .	. .
n	M[n]	#Suc de n	j .
.	M[.]	#Suc de .	j
j	M[j]	0	

Tabla 1 Estructura de la matriz de relaciones de precedencia.

Finalmente se establece la matriz en donde se relaciona la duración de ejecución de cada actividad según el modo y la cantidad de recursos con que se realice.

Actividad	modo	duración	RR[1]	RR[.]	RR[k]	RN[1]	RN[.]	RN[k]
1	1	0	0	0	0	0	0	0
n	1	p[n,1]	r[n,1,1]	r[n,1,.]	r[n,1,k]	r[n,1,1]	r[n,1,.]	r[n,1,k]
	.	p[n,.]	r[n,.,1]	r[n,.,.]	r[n,.,k]	r[n,.,1]	r[n,.,.]	r[n,.,k]
	m	p[n,m]	r[n,m,1]	r[n,m,.]	r[n,m,k]	r[n,m,1]	r[n,m,.]	r[n,m,k]
.	1	p[.,1]	r[.,1,1]	r[.,1,.]	r[.,1,k]	r[.,1,1]	r[.,1,.]	r[.,1,k]
	.	p[.,.]	r[.,.,1]	r[.,.,.]	r[.,.,k]	r[.,.,1]	r[.,.,.]	r[.,.,k]
	m	p[.,m]	r[.,m,1]	r[.,m,.]	r[.,m,k]	r[.,m,1]	r[.,m,.]	r[.,m,k]
j	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2 Estructura de la matriz de las duraciones de ejecución de cada actividad según el modo y la cantidad de recursos asociada

Después de definir lo anterior es necesario observar la estructura de cada uno de los arreglos matriciales y vectoriales que hacen parte de la construcción del sistema de información del problema como variables individuales.

Para iniciar, se parte de un cronograma de actividades, formulado en el software Microsoft Project. En éste se define tanto la duración como las relaciones de precedencia de cada actividad.

Posteriormente, se construye una tabla en donde de acuerdo a la preparación de la oferta del proyecto, a cada actividad se le asigna una variedad de modos de ejecución en los que ésta se puede ejecutar. También se especifican los requerimientos de recursos renovables y no renovables asociados a cada uno de los modos de ejecución definidos.

Luego se debe realizar un preprocesamiento de toda la información del proyecto consolidada en esta tabla a través de Visual Basic, para obtener un archivo de datos con los parámetros de entrada del problema. De igual forma se programa el modelo matemático del MRCPSp en lenguaje AMPL, donde se declaran todas las variables, parámetros, conjuntos, restricciones y función objetivo.

Por último, AMPL se encarga de articular toda la información suministrada en el archivo de datos, con el modelo programado para posteriormente entregarla al solver, encargado de encontrar la solución óptima del problema. Esta solución contiene la siguiente información básica:

- Instante de tiempo en el que inicia cada una de las actividades del proyecto, respetando todas las relaciones de precedencia propuestas en el marco del cronograma.
- Modo de ejecución en que se debe realizar cada actividad.

A partir de la información anterior, se obtiene una programación del proyecto en la que se garantiza el menor tiempo, menor costo o ambas cosas, dependiendo de lo expresado en la función objetivo. La nueva metodología propuesta permite guiar la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución.

3.4 Estrategia para considerar imprevistos, cambios y contingencias durante la ejecución real de proyectos de infraestructura eléctrica con recursos limitados y múltiples modos de ejecución

La robustez en la calidad de la respuesta para un algoritmo de ejecución óptima de procesos, se evalúa en la capacidad de no afectar la secuencia de actividades a pesar de la aparición de imprevistos; por ejemplo, que el proyecto no exceda su fecha límite de finalización. Para medir la robustez en la calidad con respecto al valor esperado de la función objetivo, como se observa en (Möhring, Schulz y Stork 2001) para el caso estocástico, o en (Van de Vonder, y otros 2006) donde se calcula el porcentaje de desviación de la duración comparado con un valor óptimo, que se calcula una vez finalizado el proyecto.

Muchos de los estudios para buscar una solución robusta hacen referencia a la estabilidad de la secuencia (tiempo de inicio de las actividades). Esto significa que, dada la incertidumbre durante la ejecución, se busca que la secuencia ejecutada difiera lo menos posible de la secuencia base. Para medir la robustez de la solución la mayoría de los autores utilizan datos relacionados con la holgura de las actividades, debido a que si una actividad tiene holgura puede modificar su tiempo de inicio o fin sin afectar otras actividades. En la secuencia utilizan medidas relacionadas con la holgura libre de las actividades como medida subrogada de la robustez de la solución (Rebekka, Felix y Frank 2015). Otro enfoque consiste en calcular la flexibilidad de la solución por medio de la cantidad de actividades no relacionadas entre si (Farhad, Farnaz y Seyed 2018).

Observando el comportamiento de la metodología propuesta y cuantificando los cortos tiempos de ejecución del algoritmo para encontrar resultados óptimos a los diferentes sistemas de prueba del capítulo 4, en comparación con los amplios tiempos de ejecución de un proyecto de infraestructura eléctrica, es posible proponer una estrategia para considerar imprevistos, retrasos, cambios y contingencias.

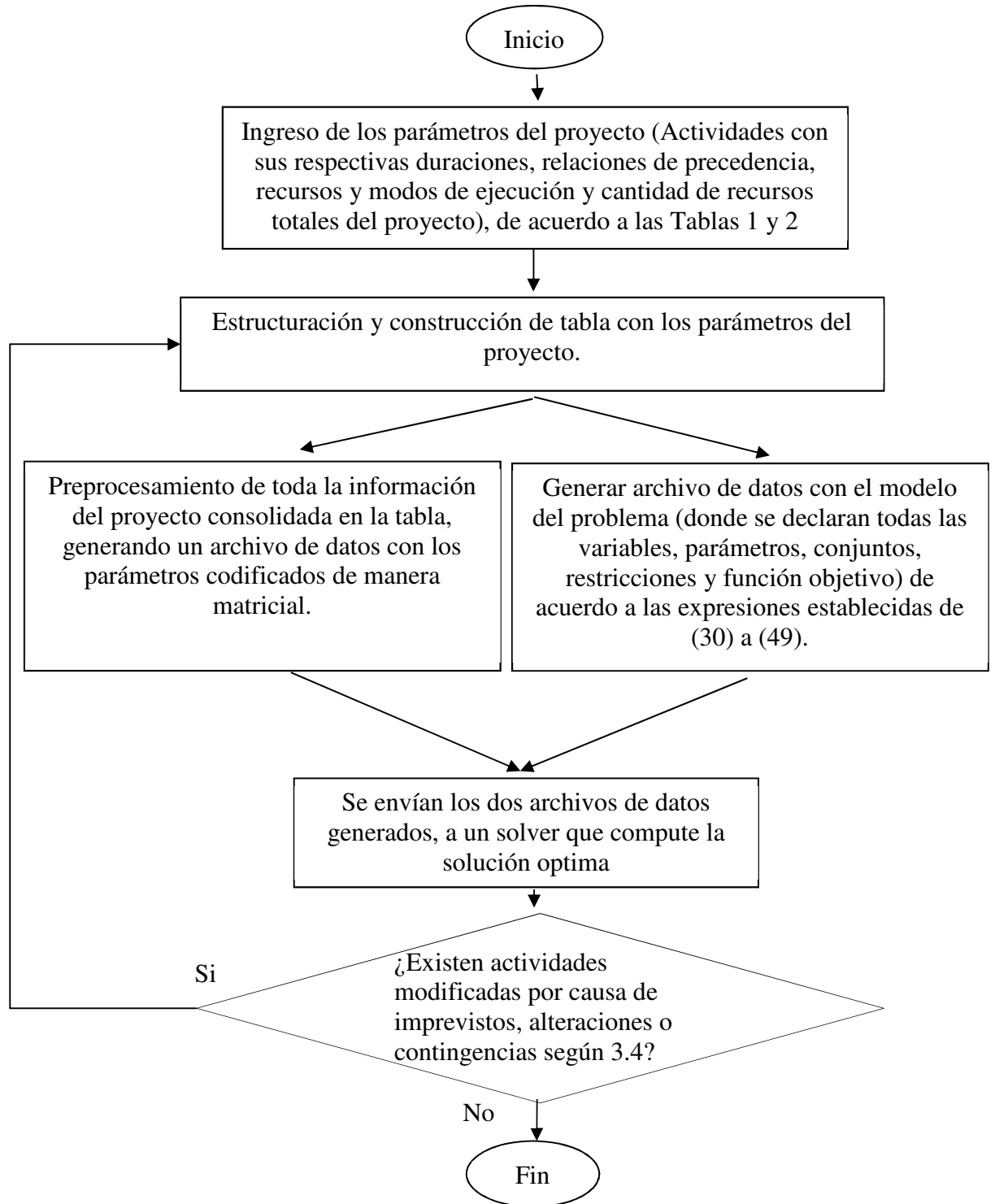
Al presentarse alguna alteración en una o varias actividades durante la ejecución de un proyecto, es posible modificar la tabla de parámetros del proyecto, indicando las nuevas duraciones y recursos requeridos por la actividad de acuerdo a los cambios, imprevistos y contingencias, y se ejecuta nuevamente la metodología fijando los parámetros y obteniendo un derrotero para ejecutar el proyecto de manera óptima, de la siguiente manera:

- a. Se identifican las actividades modificadas por causa de imprevistos, alteraciones o contingencias, redefiniéndolas nuevamente de acuerdo a los nuevos recursos y duraciones que requieran para su ejecución.

- b. Se actualiza la tabla de parámetros y estado del proyecto, sacando las actividades que ya hayan sido ejecutadas, modificando las duraciones y los recursos de las que se encuentran y finalmente agregando las nuevas duraciones, recursos y modos de ejecución de las actividades que se han visto alteradas por algún tipo de imprevisto, contingencia o cambio de alcance del proyecto.
- c. Después de tener la tabla actualizada con el estado de cada una de las actividades del proyecto, se implementa nuevamente la metodología, en busca de un resultado óptimo que incluya las nuevas condiciones de proyecto, generadas por los diferentes imprevistos, alteraciones, cambios o contingencias.

El procedimiento descrito anteriormente, permite recalcular y garantizar una nueva respuesta óptima para la ejecución del proyecto incluyendo cualquier tipo de cambio, imprevisto o contingencia que pueda presentarse.

3.5 Diagrama de flujo del algoritmo empleado por la metodología propuesta



4 Aplicación de la metodología propuesta

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el capítulo 3, como una solución al problema de la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica. Adicionalmente se analiza el comportamiento de la metodología propuesta, frente a los tiempos de duración y recursos consumidos por proyectos de infraestructura eléctrica prototipo.

4.2 Descripción de los sistemas de prueba y prototipos.

4.2.1 Descripción del sistema de prueba 1

Para validar el funcionamiento de la metodología propuesta e ilustrar la aplicación del MRCPSP en la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, inicialmente se toma un sistema de prueba de la base de datos PSPLIB (R. K. Hartmann 2005). Esta información es generalmente utilizada para la investigación de este tipo de problemas. Todas las actividades del sistema de prueba se asignan a los hitos de actividades relacionadas con la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, sin modificar ninguno de sus parámetros.

Adicionalmente, si se considera que cualquier relación de precedencia puede ser expresada en términos de otra (FC en términos de una FF, CC o CF), también se realizan estas modificaciones al sistema de prueba para contar con todo tipo de relaciones de precedencia, sin afectar los parámetros y la solución óptima de referencia para dicho sistema de prueba. Con este sistema se busca probar la efectividad de la metodología planteada y de los ajustes realizados al modelo matemático.

Nombre de tarea	Duración	Sucesoras	Predecesoras
General	0 mss	3FF+1 ms;4CC	
Adjudicación de la convocatoria	2 mss	6;9;14	
Contrato de conexión, acuerdos técnicos y administrativos	1 ms	5CC+1 ms;8CC+1 ms;11CC+1 ms	1FF+1 ms
Gestión ambiental y predial	4 mss	12FF+3 mss;16;20	1CC
Diagnóstico ambiental de alternativas DAA	2 mss	9CC+2 mss;17	3CC+1 ms
Estudio de impacto ambiental EIA y obtención de la licencia	1 ms	7;12CC+1 ms;18CC+1 ms	2
Análisis de alternativas y negociación del lote	1 ms	8CC+1 ms;17	6
Diseños	1 ms	15;16	3CC+1 ms;7CC+1 ms
Diseño conceptual y diseño básico	5 mss	10;13;16	2;5CC+2 mss
Diseño detallado	2 mss	12CC+2 mss;20	9
Bienes	3 mss	14CC+3 mss;15FF+1 ms;19CC+3 mss	3CC+1 ms
Equipos de alta tensión y sistemas secundarios	3 mss	19;21	4FF+3 mss;6CC+1 ms;10CC+2 mss

Nacionalización y transporte de equipos	2 mss	15CC+2 mss	9
Obras civiles	3 mss	18	2;11CC+3 mss
Adecuación de terreno y obras complementarias	1 ms	21	8;11FF+1 ms;13CC+2 mss
Fundaciones y edificaciones	4 mss	21	4;8;9
Montaje	5 mss		5;7
Montaje de equipos de alta incluyendo estructuras	10 mss	20	6CC+1 ms;14
Montaje de sistemas secundarios incluyendo cableado y conexionado	4 mss	22FF	11CC+3 mss;12
Pruebas	1 ms	22FF	4;10;18
Pruebas individuales y de conjunto	2 mss	22FF	12;15;16
Puesta en servicio	0 mss		19FF;20FF;21FF

Tabla 3 Sistema de prueba implementado en MS Project (Sistema de prueba 1).

4.2.2 Descripción del sistema de prueba 2

El sistema de prueba 2 se construye a partir de proyectos de infraestructura eléctrica típicos, presentando una estructura similar en cuanto a número de actividades, cantidades de recursos y de igual manera se considera que cualquier relación de precedencia puede ser expresada en términos de otra (FC en términos de una FF, CC o CF), para la construcción de una subestación de 500 kV. Este contiene las etapas más relevantes, con sus respectivas duraciones y recursos asociados, basándose en ejemplos reales.

Una de las mayores dificultades que tienen las empresas para permitir implementar esta metodología con proyectos ya ejecutados está asociada a la seguridad de la información, por este motivo no fue posible realizar una comparación directa.

Nombre de tarea	Duración	Sucesoras	Predecesoras
General	0 días	2	
Adjudicación de la convocatoria	1 día	5;8;13;20	1
Estudios para puesta en servicio	118 días	45FF	
Fecha de puesta en servicio	0 días	45FF	
Contrato de conexión	0 días	6	2
Acuerdos técnicos	90 días	7	5
Acuerdos administrativos y firma del contrato de conexión	180 días	45FF	6
Lote subestación	0 días	9	2
Análisis de alternativas de lotes	130 días	10	8
Negociación del lote	30 días	13;14CC;26	9
Perfeccionamiento y firma	100 días	12;17;29	
Licencia de construcción subestación	40 días	32;35;36	11
Gestión ambiental subestación	0 días	14	2;10
Diagnóstico Ambiental de Alternativas	0 días	15	10CC;13
Análisis de alternativas de lotes, edición documento de DAA, evaluación y expedición DAA por parte del ANLA	60 días	16	14
Estudio de impacto ambiental	0 días	17	15
Caracterización ambiental e Identificación y evaluación de impactos	60 días	18	11;16

Elaboración PMA	60 días	19	17
Entrega, evaluación y expedición de licencia por parte del ANLA	90 días	32;35;36;37;38;34FC+45 días	18
Bienes subestación	0 días	21;22;23;24;25	2
Transformadores y reactores	340 días	41	20
Equipos de alta tensión	300 días	41	20
Equipos secundarios	280 días	42	20
Estructuras, Aisladores, tubos, conectores y malla de puesta a tierra	250 días	40	20
Cables de alta y baja tensión	180 días	41;42	20
Diseño subestación	0 días	27	10
Diseño conceptual, disposición general de la subestación y esquemas de conexión	75 días	28	26
Diseño básico, Estudios geotécnicos, topografía y disposición física.	75 días	29	27
Diseño básico de estructuras metálicas y obras civiles.	60 días	30	11;28
Diseño detallado de estructuras metálicas, adecuación de terreno y diseños de obras civiles y especificaciones.	75 días	40;41;38	29
Diseño detallado de sistemas secundarios, especificaciones técnicas de material de conexión y montaje.	75 días	42	
Adecuación terrena y obras civiles subestación	0 días	33	12;19
Contratación de Adecuación de terreno y obras civiles	60 días	34	32
Actividades previas y obras complementarias	105 días	35CC+30 días;36CC+30 días	19FC+45 días;33
Fundaciones 500 kV	180 días	36	12;19;34CC+30 días
Obra civil transformadores y reactores	120 días	41	12;19;34CC+30 días;35
Obras civiles alimentación auxiliares y Edificaciones	140 días	42	19
Montaje subestación	0 días	39CC-45 días	19;30
Contratación montaje	60 días	40	38CC-45 días
Montaje de estructuras y pórticos	75 días	41	24;30;39
Montaje de equipos de alta tensión	90 días	43CC+15 días	21;22;25;30;36;40
Montaje de sistemas secundarios (servicios auxiliares, casetas de control y protecciones y edificio de control) cableado y conexonado	90 días	44	23;25;31;37
Pruebas de equipos de alta tensión	45 días	44	41CC+15 días
Pruebas de conjunto subestación 500 kV	20 días	45	42;43
Puesta en servicio subestación	0 días		3FF;4FF;7FF;44

Tabla 4 Sistema de prueba implementado en MS Project (Sistema de prueba 2).

4.3 Procedimiento de implementación

Para la implementación de la metodología se ilustra la solución óptima del Sistema de Prueba 1. Inicialmente se parte con el sistema propuesto en MS Project, teniendo en cuenta solo un modo de ejecución para las actividades y sin considerar recursos.

Posteriormente, se genera la tabla que incluye los diferentes modos de ejecución y los recursos requeridos por cada actividad como se muestra en la Tabla 5. Según lo propuesto en sistema de prueba 1, de la base de datos PSPLIB (R. K. Hartmann 2005).

Número de la actividad	Nombre de la actividad	Numero de modos de ejecución	Duración de la actividad en cada modo de ejecución	Actividades sucesoras	Recursos no renovables tipo 1	Recursos no renovables tipo 2	Tipo de recurso 1	Tipo de recurso 2
1	General	1	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
1		2	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
1		3	0	2FC;3FF;4CC	0	0	0	0
2	Adjudicación de la convocatoria	1	2	6FC;9FC;14FC	0	9	0	7
2		2	8	6FC;9FC;14FC	0	9	7	0
2		3	10	6FC;9FC;14FC	0	9	6	0
3	Contrato de conexión, acuerdos técnicos y administrativos	1	1	5CC;8CC;11CC	4	0	0	2
3		2	5	5CC;8CC;11CC	0	3	0	2
3		3	7	5CC;8CC;11CC	4	0	0	1
4	Gestión ambiental y predial	1	4	12FF;16FC;20FC	0	5	9	0
4		2	6	12FF;16FC;20FC	10	0	7	0
4		3	10	12FF;16FC;20FC	0	3	0	2
5	Diagnostico ambiental de alternativas DAA	1	2	9CC;17FC	0	2	0	3
5		2	3	9CC;17FC	9	0	0	3
5		3	5	9CC;17FC	8	0	0	2
6	Estudio de impacto ambiental EIA y obtención de la licencia	1	1	7FC;12CC;18CC	9	0	0	4
6		2	6	7FC;12CC;18CC	8	0	0	4
6		3	7	7FC;12CC;18CC	6	0	0	2
7	Análisis de alternativas y negociación del lote	1	1	8CC;17FC	0	10	0	10
7		2	6	8CC;17FC	0	2	0	9
7		3	10	8CC;17FC	5	0	0	9
8	Diseños	1	1	15FC;16FC	9	0	7	0
8		2	2	15FC;16FC	5	0	5	0
8		3	3	15FC;16FC	0	6	4	0
9	Diseño conceptual y diseño básico	1	5	10FC;13FC;16FC	0	3	0	9
9		2	7	10FC;13FC;16FC	0	2	0	9
9		3	10	10FC;13FC;16FC	0	2	0	7
10	Diseño detallado	1	2	12CC;20FC	0	10	0	6
10		2	3	12CC;20FC	0	4	0	5
10		3	3	12CC;20FC	0	7	0	3
11	Bienes	1	3	14CC;15FF;19CC	0	4	0	4
11		2	5	14CC;15FF;19CC	0	2	3	0
11		3	6	14CC;15FF;19CC	3	0	1	0
12	Equipos de alta tensión y sistemas secundarios	1	3	19FC;21FC	0	9	0	4
12		2	5	19FC;21FC	0	8	4	0
12		3	6	19FC;21FC	3	0	0	3
13	Nacionalización y transporte de equipos	1	2	15CC	0	5	7	0
13		2	6	15CC	0	4	6	0
13		3	10	15CC	0	2	0	6
14	Obras civiles	1	3	18FC	0	4	6	0
14		2	7	18FC	5	0	2	0
14		3	8	18FC	4	0	0	2
15	Adecuación de terreno y obras complementarias	1	1	21FC	5	0	0	1
15		2	3	21FC	5	0	3	0
15		3	4	21FC	2	0	2	0
16	Fundaciones y edificaciones	1	4	21FC	3	0	0	4
16		2	8	21FC	0	3	0	3
16		3	8	21FC	3	0	0	1
17	Montaje	1	5	19FF	0	7	7	0
17		2	9	19FF	1	0	0	9
17		3	10	19FF	0	4	0	8
18	Montaje de equipos de alta incluyendo estructuras	1	10	20CC	9	0	1	0
18		2	10	20CC	0	3	0	2
18		3	10	20CC	0	5	5	0
19	Montaje de sistemas secundarios incluyendo cableado y conexonado	1	4	22FC	0	5	3	0
19		2	6	22FC	0	4	1	0
19		3	10	22FC	2	0	0	4
20	Pruebas	1	1	22FC	5	0	0	5
20		2	7	22FC	3	0	6	0
20		3	9	22FC	0	5	3	0
21	Pruebas individuales y de conjunto	1	2	22FC	8	0	7	0
21		2	8	22FC	4	0	6	0
21		3	9	22FC	2	0	3	0
22	Puesta en servicio	1	0	-	0	0	0	0
22		2	0	-	0	0	0	0
22		3	0	-	0	0	0	0

Tabla 5 Sistema de prueba 1 incluyendo diferentes modos de ejecución y los recursos requeridos por cada actividad

Después de tener todos los parámetros de entrada requeridos por la metodología, se realiza el procesamiento de la información a través del software Visual Basic, con el fin de generar un archivo de datos que contiene toda la información en diferentes matrices, como lo requiere el modelo matemático del problema, En el Anexo 1 de este documento, se presenta la estructura de cada una de las matrices necesarias para encontrar una solución óptima:

Después de definir y generar en un archivo de datos, las matrices planteadas en el Anexo 1, las cuales contienen los parámetros del sistema de pruebas, se genera un archivo de datos con todo el modelo matemático (Parámetros, variables, conjuntos función objetivo y restricciones) como se muestra en el Anexo 2 de este documento.

Generando el archivo de datos con todos los parámetros del sistema de forma matricial y el archivo con el modelo matemático para resolver el problema, es posible se ejecutar AMPL el cual se encarga de articular toda la información suministrada en los archivos de datos e interactuar con algún solver CPLEX 12.5 para encontrar el óptimo del problema. Para el caso del ejemplo de aplicación propuesto, los resultados obtenidos se presentan en el numeral 4.4 de este capítulo.

4.4 Resultados obtenidos

Las tablas 4.1, 4.2, muestran el comportamiento de la metodología propuesta donde se selecciona el modo de ejecución para cada una de las actividades y se indica el periodo en el cual se debe iniciar cada actividad, para garantizar un óptimo en la ejecución del proyecto.

4.4.1 Resultados obtenidos para el sistema de prueba 1

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el sistema de prueba 1, implementando la metodología propuesta. Lo anterior considerando que la duración de la primera y de la última actividad es igual a cero, debido a que son los hitos que marcan el inicio y el fin del proyecto, el instante de tiempo en que la actividad final inicia es igual a la duración óptima del proyecto. En este caso, para el sistema de prueba 1 la duración del proyecto es de 33 unidades de tiempo, la cual se constituye como el resultado óptimo de este sistema de prueba.

Actividad	Modo de ejecución	Periodo de Inicio	Actividad	Modo de ejecución	Periodo de Inicio
1	1	0	12	3	17
2	1	0	13	3	10
3	1	0	14	1	6
4	3	0	15	3	20
5	1	1	16	1	20
6	3	2	17	2	18
7	2	9	18	2	15
8	2	15	19	2	27
9	2	3	20	2	25

10	2	14	21	3	24
11	2	1	22	1	33

Tabla 6 Resultado óptimo sistema de prueba 1.

A partir de la realización de las pruebas, se verificó que aun reescribiendo las relaciones de precedencia Fin-Comienzo en términos de otras relaciones, esta modificación al modelo no altera su solución.

Como se observa en la tabla 1, el resultado de la metodología implementada selecciona el modo de ejecución para cada una de las actividades e indica el periodo en el cual se debe iniciar una actividad. Considerando que para este caso, la actividad 22 es ficticia, no tiene predecesoras y tiene una duración igual a 0, la duración total de la ejecución del proyecto es de 33 unidades de tiempo. Este resultado corresponde a la respuesta óptima para el problema de referencia tomado de la base de datos PSPLIB [11].

De esta manera, la nueva metodología implementada garantiza la obtención de la solución óptima al problema, considerando cualquier tipo de relación de precedencia y restricciones binarias que aseguran que cada actividad se ejecute de forma ininterrumpida desde su periodo de inicio y durante su ejecución.

4.4.2 Resultados obtenidos para el sistema de prueba 2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el sistema de prueba 2, implementando la metodología propuesta. De igual manera se considera que la duración de la primera y de la última actividad es igual a cero, debido a que son los hitos que marcan el inicio y el fin del proyecto, el instante de tiempo en que la actividad final inicia es igual a la duración óptima del proyecto.

Actividad	Modo de ejecución	Periodo de Inicio	Actividad	Modo de ejecución	Periodo de Inicio	Actividad	Modo de ejecución	Periodo de Inicio
1	1	0	16	1	166	31	2	324
2	1	0	17	3	166	32	1	346
3	1	12	18	3	211	33	1	346
4	1	596	19	1	256	34	2	406
5	1	87	20	1	1	35	3	436
6	1	87	21	1	376	36	1	596
7	1	520	22	1	384	37	2	480
8	1	1	23	1	406	38	1	517
9	2	1	24	1	22	39	1	472
10	2	111	25	1	25	40	2	532
11	1	0	26	1	130	41	1	716

12	1	251	27	2	130	42	1	686
13	1	126	28	2	191	43	1	731
14	1	126	29	1	251	44	1	776
15	2	126	30	2	311	45	1	796

Tabla 7 Resultado óptimo sistema de prueba 2.

La metodología implementada permite obtener mucha información, al poner a interactuar la combinatoriedad de los modos de ejecución que tiene cada actividad, buscando ejecutar el proyecto en el menor tiempo posible y con los recursos establecidos. De la Tabla 7 es posible inferir que el menor tiempo para ejecutar el proyecto es de 796 días, y los recursos no renovables, en este caso el dinero para ejecutar el proyecto es el resultado de la suma del costo de ejecutar cada actividad en el modo indicado en la tabla.

De la misma manera es posible realizar análisis específicos, sobre el uso de recursos renovables en diferentes etapas del proyecto, permitiendo una planeación adecuada o una redistribución de recursos, modificando los modos de ejecución de ser necesario.

4.5 Características y tendencias del comportamiento de la metodología propuesta

Como pudo observarse en la solución de cada uno de los sistemas de prueba propuestos, la metodología implementada es una herramienta adecuada para la toma de decisiones en la ejecución de proyectos, garantizando soluciones óptimas según el enfoque de la función objetivo.

Es importante señalar que el comportamiento de la metodología puede variar ante sistemas de prueba que contengan un número elevado de actividades, mayores relaciones de precedencia y una cantidad mayor de recursos. En estos casos la metodología puede variar los tiempos de ejecución.

Los tiempos de ejecución de la metodología son muy pequeños comparados con la duración y los tiempos de ejecución de un proyecto de infraestructura eléctrica real. Sin embargo, es posible profundizar en técnicas de solución para mejorar los tiempos de ejecución de la metodología, para proyectos de mayor número de actividades.

El comportamiento de la propuesta realizada permite incluir cualquier tipo de relación de precedencia entre actividades, incluyendo diferentes retardos.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología novedosa para el apoyo en la toma de decisiones, durante la programación óptima de actividades en proyectos de infraestructura eléctrica, con recursos limitados y múltiples modos de ejecución. Se utilizan herramientas desarrolladas para procesar de forma automática, los datos provenientes de MS Project y suministrar los datos de entrada para resolver el modelo matemático mediante AMPL.

En este documento se realiza una revisión bibliográfica, cuyo resultado muestra muchos métodos publicados para resolver los problemas RCPSP y MRCPSP. Existen diferentes algoritmos exactos y heurísticos que brindan una solución, pero no se reportan metodologías aplicadas a la temática de ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica.

De igual forma, en este documento se presentan elementos propios de la gerencia de proyectos, articulados con la normatividad y regulación de la ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia, el cual ofrece una guía conceptual para tener un panorama general sobre este tema.

Como resultado valioso adicional, se presentó el desarrollo de un modelo matemático genérico, que requiere datos de entrada y procesamiento mínimos, gracias a la formulación disyuntiva (combinación de variables binarias y parámetro bigM), para indicar la ejecución de una actividad durante un periodo de tiempo determinado. Este aspecto constituye una diferencia con otros modelos que utilizan datos adicionales como el Comienzo Temprano y Fin Temprano (Earliest/Latest start), que acotan el espacio de solución con el fin de facilitar su implementación.

Sumado a lo anterior, en este documento se presenta el desarrollo de la formulación matemática, que permite incluir en el modelo todas las relaciones de precedencia (FC, CC, FF, CF), considerando adelanto o retraso.

De otra parte, se cumplen los objetivos planteados en este trabajo de grado, logrando generar un documento que proporciona una herramienta teórico - práctica para la toma de decisiones y la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia.

Finalmente, la nueva metodología implementada garantiza la obtención de la solución óptima (menor tiempo, menor costo o ambas), al problema de ejecución de proyectos de infraestructura eléctrica, los cuales son de recursos limitados y múltiples modos de ejecución, mediante la toma de decisiones y la asignación de recursos. Este aspecto permite obtener una herramienta complementaria a las propuestas por otras plataformas, orientadas a la administración y el seguimiento de proyectos.

5.2 Recomendaciones

Para garantizar un buen desempeño de la metodología propuesta, es muy importante tener una certeza y muy buena experticia a la hora de asignar el modo de ejecución a cada actividad, con esto es posible encontrar combinaciones que garanticen un óptimo en tiempo y/o costos en la ejecución del proyecto.

Teniendo en cuenta los cortos tiempos de ejecución de la metodología para encontrar resultados óptimos, en comparación con los amplios tiempos de ejecución de un proyecto de infraestructura eléctrica y considerando la dinámica cambiante en los objetivos a optimizar en un proyecto a lo largo de la ejecución, se recomienda ser oportunos a la hora de ejecutar nuevamente la metodología ante la aparición cualquier tipo de cambio, imprevisto o contingencia que pueda presentarse.

5.3 Trabajos futuros

El estudio llevado a cabo en este trabajo de grado ha presentado una metodología novedosa para la ejecución óptima de proyectos de infraestructura eléctrica, mediante la solución de sistemas de prueba típicos, como una futura línea de investigación se propone resolver sistemas de prueba o proyectos reales más robustos, donde las técnicas exactas no van a presentar un buen desempeño debido al gran número de variables, y se requiera la parametrización de técnicas heurísticas o metaheurísticas, para mejorar tiempos de respuesta y encontrar soluciones de buena calidad en materia de tiempos o recursos.

Incluir en el modelo matemático una formulación multi-objetivo que permita analizar y ponderar de manera adecuada los objetivos a optimizar en la metodología, incluyendo aspectos como costo, tiempo y calidad.

De igual manera como línea de trabajo futura, se propone ahondar en la formulación del modelo matemático que representa el problema, para considerar imprevistos. La literatura especializada presenta varias modificaciones al modelo utilizan datos relacionados con la holgura de las actividades, debido a que si una actividad tiene holgura puede modificar su tiempo de inicio o fin sin afectar la duración del proyecto, lo que puede presentar un aporte para la metodología.

Debido a los buenos resultados obtenidos, junto con los cortos tiempos de ejecución requeridos, es posible que la metodología desarrollada sea adecuada para su incorporación a software profesional de gestión de proyectos a través de diferentes aplicativos que hagan un entorno amigable con el usuario.

5.4 Publicaciones

A continuación, se presentan las publicaciones relacionadas con el trabajo de investigación realizado, que comprenden artículos en revistas y participaciones en simposios y congresos de ingeniería eléctrica:

1. Ponencia en las Jornadas del Conocimiento 2017 de ISA S.A. E.S.P., con el tema “Programación óptima de procesos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución en proyectos de infraestructura eléctrica en Colombia”. Realizado del 24 al 26 de octubre de 2017, en la ciudad de Medellín. Esta fue la séptima versión del principal escenario realizado cada dos años, en que empleados de distintos negocios y países proponen mejoras a la operación del grupo empresarial.
2. Ponencia en el Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL 2017, con el tema “Programación óptima de procesos con recursos limitados y múltiples modos de ejecución en proyectos de infraestructura eléctrica” Realizado del 1 al 03 de noviembre de 2017, en la ciudad de Bucaramanga. Esta fue la novena versión del evento realizado cada dos años en el cual se genera un espacio de discusión académica y profesional sobre las temáticas relacionadas con la Calidad de la Energía Eléctrica y sus implicaciones en diversos sectores de la sociedad.
3. Publicación de artículo “Multimode resource constrained project scheduling problem in electric infrastructure projects” J. Arrieta, J. Mora, Volumen 9, 2017. ISSN electrónico 2357-6618 SICEL - Portal de Revistas UN - Universidad Nacional de Colombia

6 Referencias

- Alvarez-Valdes, R., y J.M. Tamarit. «The project scheduling polyhedron: dimension, facets and lifting theorems.» *European Journal of Operational Research*, nº 67 (1993): 204–220.
- Alvarez-Valdes, R., y J.M. Tamarit. «The project scheduling polyhedron: dimension, facets and lifting theorems.» *European journal of operational research* 67 (1993): 204–220.
- CREG. 13 de agosto de 2018. <http://www.creg.gov.co/> (último acceso: 18 de agosto de 2018).
- Demeulemeester, E.L., y W. Herroelen. *Project scheduling: a research handbook*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Elmaghraby, S.E. *Project planning and control by network models*. New York, 1997.
- Escobar, Antonio. *Programación lineal entera*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- Farhad, Habibi, Barzinpour Farnaz, y Jafar Sadjadi Seyed. «Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments.» *Journal of Project Management* 3 (2018).
- Hartmann, R. Kolisch und S. *Project scheduling problem library – PSPLIB*. 18 de abril de 2005. <http://www.omdb.wi.tum.de/psplib/getdata.cgi?mode=mm>. (último acceso: 17 de marzo de 2018).
- Hartmann, S. «Project scheduling under limited resources - models, methods and applications.» *Lecture notes in economics and mathematical systems* 48 (1999): 221.
- Hernandez, Tito. *Gestión Y Aprendizaje Organizacional En Procesos De Desarrollo*. Santa: INCADES, 2011.
- Kaplan, L.A. *Resource-constrained project schedulling with preemption of jobs*. Michigan: PhD thesis, University of Michigan, 1988.
- Klaus, Neumann. «Project scheduling with time windows and scarce resources.» *Karlsruhe Springer* 1 (2002): 385.
- Kolisch, R., y A. Drexel. «Local search for nonpreemptive multi-mode resource constrained project scheduling.» *IIE transactions* 29 (1997): 987–999.
- Mario, Brčić, Kalpić Damir, y Fertilj Krešimir. «Resource constrained project scheduling under uncertainty: a survey.» *Faculty of Electrical Engineering and Computing*, 2015.
- Mingozzi, A., V. Maniezzo, S. Ricciadelli, y L. Bianco. «An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation.» *Management Science*, nº 44 (1998): 715–729.

- Möhring, R. H., A. S. Schulz, y F., Stork. «On project scheduling with irregular starting time costs.» *Operations Research Letters* 4, n° 28 (2001): 149-154.
- Posada, Mariamar Cervantes. *Nuevos métodos meta heurísticos para la asignación eficiente, optimizada y robusta de recursos limitados*. Valencia, 2009.
- Pritsker, A.B., P.M. Watters, y L.J. and Wolfe. «Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach.» *Management Science* 16 (1969): 93-108.
- Project Management Institute, Inc. *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos*. Cuarta. Pennsylvania: Global Standard), 2008.
- Rebekka, Volk, Hübner Felix, y Schultmann Frank. «Robust multi-mode resource constrained project scheduling of building deconstruction under uncertainty.» *Mista*, 2015: 2-4.
- Romero, Carlos. *Técnicas de programación y control de proyectos*. Piramide, 2002.
- Sapag Chain, Nassir , y Reinaldo Sapag Chain. *Preparación y evaluación de proyectos*. Bogotá: McGraw Hill, 2008.
- Sturm, Martin. *Solving multimodal resource constrained project scheduling problems*. Wien, 2012.
- UNED. *Teoría general de la gestión de proyectos*. Madrid: Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la UNED, 2017.
- Unidad de Planeación Minero Energetica UPME. *Plan de expansión de referencia generación - transmisión*. Colombia: Editorial Scripto Ltda, 2010.
- UPME. «UPME.» 17 de agosto de 2018. www1.upme.gov.co (último acceso: 19 de agosto de 2018).
- Van de Vonder, S., E. Demeulemeester, W. Herroelen, y R & Leus. «The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling.» *International Journal of Production Research* II, n° 44 (2006): 215-236.
- Zeledón, Mauricio Navarro. «Administración y gestión de proyectos.» 2015: 1.
- Zimmermann, J., K. Neumann, y C. Schwindt. *Project scheduling with time windows and scarce resources*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

7 Anexos

7.1 Anexo 1

```
param d := 155;          (Obtenida de sumar las duraciones más largas de cada actividad)

param V := 22;          (Numero de actividades)

param: Actividades :M (Numero de modos de ejecución de cada actividad)

1      3
2      3
.      .
.      .
21     3
22     ;

param p_im := (Duraciones de cada actividad en cada modo de ejecución)

[1,1]    0
[1,2]    0
[1,3]    0
[2,1]    2
[2,2]    8
[2,3]    10
.        .
.        .
[21,1]   2
[21,2]   8
[21,3]   9
[22,1]   0
[22,2]   0
[22,3]   0;

set sucFC [1] := 2; (Relaciones de precedencia entre actividades tipo Fin Comienzo)
set sucFC [2] := 6 9 14;
```

```

.
.
set sucFC [21] := 22;
set sucFC [22] := ;

param diasFC := (Periodo de retraso o adelanto establecido en días de una relación de
precedencia tipo Fin Comienzo, para cada actividad)

[1,*] 2 0
[2,*] 6 0 9 0 14 0
[4,*] 16 0 20 0
.
.
[20,*] 22 0
[21,*] 22 0 ;

set sucCC [1] := 4;   (Relaciones de precedencia entre actividades tipo Comienzo Comienzo)
set sucCC [2] := ;

.
.
set sucCC [21] := ;
set sucCC [22] := ;

param diasCC := (Periodo de retraso o adelanto establecido en días de una relación de
precedencia tipo Comienzo, para cada actividad)

[1,*] 4 0
[3,*] 5 0 8 0 11 0
[13,*] 15 0
.
.
[18,*] 20 0 ;

set sucFF [1] := 3;   (Relaciones de precedencia entre actividades tipo Fin Fin)

set sucFF [2] := ;

```

```

set sucFF [3] := ;

.

.

set sucFF [21] := ;

set sucFF [22] := ;


param diasFF := (Periodo de retraso o adelanto establecido en días de una relación de
precedencia tipo Fin, para cada actividad)


[1,*] 3 0
[4,*] 12 0

.

.

[11,*] 15 0
[17,*] 19 0 ;


set sucCF [1] := ;      (Relaciones de precedencia entre actividades tipo Comienzo Fin)
set sucCF [2] := ;

.

.

set sucCF [21] := ;
set sucCF [22] := ;


param diasCF := (Periodo de retraso o adelanto establecido en días de una relación de
precedencia tipo Comienzo Fin, para cada actividad);


set Rp := 3 4 ; (Conjunto de recursos renovables y no renovables)
set Rv := 1 2 ;


param r_ikm := (Cantidad de cada tipo de recursos requeridos por cada actividad en cada modo
de ejecución)

[1,1,1]    0
[1,2,1]    0
[1,3,1]    0

```

[1, 4, 1]	0
[1, 1, 2]	0
[1, 2, 2]	0
[1, 3, 2]	0
[1, 4, 2]	0
[1, 1, 3]	0
[1, 2, 3]	0
[1, 3, 3]	0
[1, 4, 3]	0
.	
.	
[22, 1, 1]	0
[22, 2, 1]	0
[22, 3, 1]	0
[22, 4, 1]	0
[22, 1, 2]	0
[22, 2, 2]	0
[22, 3, 2]	0
[22, 4, 2]	0
[22, 1, 3]	0
[22, 2, 3]	0
[22, 3, 3]	0
[22, 4, 3]	0;

param R := (Cantidad de cada tipo de recursos renovables y no renovables)

[1] 30

[2] 37

[3] 16

[4] 21;

7.2 Anexo 2

```
# Conjuntos - Índices en los que se mueve el problema
set Rp; #Recursos renovables
set Rv; #Recursos no renovables
set Actividades; #Conjunto de actividades

# Parámetros - datos de entrada
param d integer; # Tiempo max ejecución según los modos (Horizonte)
param V integer; # Actividades
param M {Actividades} integer; # Modos de ejecución
param p_im {i in Actividades, 1..M[i]} integer; # Tiempo de ejecución
param r_ikm {i in Actividades, Rp union Rv, 1..M[i]}; # Consumo de recursos
param R {Rp union Rv}; # Disponibilidad de recursos

# Conjunto de sucesoras
set sucFC {Actividades};
set sucCC {Actividades};
set sucFF {Actividades};
set sucCF {Actividades};

#Conjunto de dias de adelanto o retraso para cada relación de precedencia
param diasFC {i in Actividades, j in sucFC[i]};
param diasCC {i in Actividades, j in sucCC[i]};
param diasFF {i in Actividades, j in sucFF[i]};
param diasCF {i in Actividades, j in sucCF[i]};

# Variables
var x {i in Actividades, 1 .. M[i]} binary; # Variable de decisión modo
var rv_ik {Actividades,Rv}; # Consumo de recursos no renovables modo
var rv_k {Actividades}; # Consumo de recursos no renovables total
var rp_ik {Actividades, Rp}; # Consumo de recursos renovables modo
var rp_kt {Rp, 0 .. d}; # Consumo de recursos renovables total para cada etapa
var p {Actividades}; # Tiempo de ejecución modo
var S {Actividades} integer; # Periodo de inicio de la actividad

#Variables disyuntivas
var a {i in Actividades, 1 .. M[i], 0 .. d} binary; #Variable binaria
var a_1 {Actividades, 0 .. d} binary;
var a_2 {Actividades, 0 .. d} binary;

# Modelo

#Funcion Objetivo
minimize Makespan:
S[V];

# Todos los trabajos se deben ejecutar en un solo modo
subject to UnicoModoEjecucion {i in Actividades}:
sum {m in 1 .. M[i]} x[i,m] = 1;

# Recurso no renovable consumido por modo de ejecucion
subject to ConsumoNoRenovable {i in Actividades,k in Rv}:
rv_ik[i,k]= sum {m in 1 .. M[i]} r_ikm[i,k,m]*x[i,m];

# Recurso no renovable consumido global
subject to ConsumoNoRenovableGlobal {k in Rv}:
rv_k[k]= sum {i in Actividades} rv_ik[i,k];

# Restriccion de recurso no renovable
subject to LimiteNoRenovable {k in Rv}:
rv_k[k]<=R[k];

# Recurso renovable consumido global para cada etapa
subject to ConsumoRenovableGlobal {k in Rp, t in 0 .. d}:
rp_kt[k,t]= sum {i in Actividades} sum {m in 1 .. M[i]} r_ikm[i,k,m]*a[i,m,t];
```

```

# 1 Interseccion de variables binarias para formar a
subject to Interseccion {i in Actividades, m in 1 .. M[i], t in 0 .. d}:
a[i,m,t] >= x[i,m] + a_1[i,t] + a_2[i,t] - 2;

# 2 Corte desde Si hasta d
subject to CorteSuperior {i in Actividades, t in 0 .. d}:
1000000*a_2[i,t] >= t - S[i];

# 3 Corte desde 0 hasta Si+pi
subject to CorteInferior {i in Actividades, t in 0 .. d}:
1000000*a_1[i,t] >= S[i] + p[i] - t + 1;

# Restriccion de recurso renovable
subject to LimiteRenovable {k in Rp, t in 0 .. d}:
rp_kt[k,t] <= R[k];

# Tiempo consumido por el modo de ejecucion
subject to ConsumoTiempo {i in Actividades}:
p[i] = sum {m in 1 .. M[i]} p_im[i,m] * x[i,m];

# Precedencia fin comienzo
subject to PrecedenciaFC {i in Actividades, j in sucFC[i]}:
S[j] - S[i] >= p[i] + diasFC[i,j];

# Precedencia comienzo
subject to PrecedenciaCC {i in Actividades, j in sucCC[i]}:
S[j] - S[i] >= diasCC[i,j] + p[i];

# Precedencia fin
subject to PrecedenciaFF {i in Actividades, j in sucFF[i]}:
S[j] - S[i] >= p[i] + diasFF[i,j];

# Precedencia comienzo fin
subject to PrecedenciaCF {i in Actividades, j in sucCF[i]}:
S[i] - S[j] >= p[j] + diasCF[i,j] + p[i] + p[j];

# Condicion de positividad de S
subject to SPositivo {i in Actividades}:
S[i] >= 0;

# Condicion de primera actividad ficticia
subject to S_0:
S[1] = 0;

```